LIMP- HANDBUCH Ω

Impedanzmessung
Thiele Small Parameter (TSP)
RLC-Meter

Basismaterial ARTA-Handbücher & ARTA Kompendium
Dr. Heinrich Weber, deutsche Bearbeitung und Ergänzungen
Dr. Ivo Mateljan, englische Originalhandbücher
© Weber/Mateljan

Version 2.40D, Juni 2013 (ARTA 1.80)

Änderungen Version 2.30D – ARTA 1.80

Kapitel	Hinweis zu Änderungen / Ergänzungen
-	Separierung vom ARTA-Kompendium
2.2.2	Kompensation von Messleitungen
3.1	Vorbereitung der TSP-Messung (Anregungssignal, Messlage, Einspielen, …)
3.2	Einführung verschiedener Ersatzschaltbilder zur Ermittlung der TSP
3.2	Ermittlung von R_E aus dem gemessenen Impedanzverlauf
4.0	Overlays und Targets
5.0	RLC-Meter, Ergänzungen
6.0	Messgenauigkeit, Ergänzungen

Inhalt

0. Vorwort 4

1. LIMP, Einleitung 4

1.1 Voraussetzungen für die Nutzung und Installation 4
1.2 Erforderliches und nützliches Zubehör 4
1.3 Pinbelegung von NF-Kabeln und NF-Steckern 6

2. LIMP, Messprinzip und Messaufbau 7

2.1 Messprinzip und praktische Umsetzung 7
2.1.1 Impedanzmessung am Kopfhörerausgang der Soundkarte 7
2.1.2 Impedanzmessung mit Leistungsverstärker 9

2.2 LIMP, Bedienung 10

2.2.1 Grundeinstellung von LIMP 11
2.2.2 Kompensation der Messleitungen 14

3. LIMP, Ermittlung der Thiele-Small-Parameter 16

3.1 Vorbereitung der TSP-Messung 16
3.1.1 Stärke des Anregungssignals 16
3.1.2 Einspielen - Break In 17
3.1.3 Einspannbedingungen und Messlage 17
3.1.4 Ermittlung S_D 19
3.1.5 Messung von R_E 19
3.2 Lautsprechermodelle zur TSP-Ermittlung 20
3.3 TSP-Ermittlung, Volumenmethode 23
3.4 TSP-Ermittlung, Massemethode 25

4. LIMP, Arbeiten mit Overlay und Target 27

5. LIMP als RLC-Meter 29

6. LIMP, Genauigkeit der Messung 32

7. ARTA Application Notes 33

8. Literatur 33

9. Index 34

0. Vorwort

Aufgrund des mittlerweile beträchtlichen Umfangs und der unübersichtlich gewordenen Struktur des ARTA-Kompendiums wurde seitens vieler Anwender eine Aufteilung in separate Handbücher gewünscht. Mit dem vorliegenden LIMP-Handbuch wird der erste Schritt in Richtung separater Handbücher eingeleitet.

LIMP ist ein Programm zur Messung von komplexen Impedanzen an Bauteilen (LCR-Meter), Lautsprechern und Systemen sowie zur Ermittlung der sogenannten Thiele-Small-Parameter (TSP) von Lautsprecherchassis. Als Anregungssignal stehen ein Rauschsignal (Pink-PN) und ein gestufter Sinus (Stepped Sine) zur Verfügung.

Ω LIMP – Impedanzmessung, TSP, RLC-Meter, Qualitätssicherung

Das vorliegende Handbuch soll Anwendern die Nutzung von LIMP aus der ARTA-Programmfamilie nahe bringen. Das LIMP-Handbuch ist weder eine Übersetzung noch ein Ersatz für das englischsprachige Originalhandbuch. Es wird daher empfohlen, das Originalhandbuch parallel zu Rate zu ziehen.

Eine zusätzliche Informationsquelle stellt die ARTA-Homepage dar. Dort werden für den Anwender aktuelle Informationen und Application-Notes bereitgestellt.

Es ist vorgesehen, das Handbuch im Laufe der Zeit ständig zu ergänzen und zu aktualisieren. Dennoch bitten wir um Verständnis, wenn nicht jederzeit jede Maske dem aktuellen ARTA-Release entspricht. Verbesserungs- und Korrekturvorschläge sowie Anregungen zu Programmerweiterungen sind natürlich jederzeit willkommen.

1. LIMP, Einleitung

1.1 Voraussetzungen für die Nutzung und Installation

Die Nutzung der Programme der ARTA-Familie setzt voraus, dass die folgenden Bedingungen erfüllt sein müssen:

Betriebssystem: Windows 98 /ME / 2000 / XP / VISTA / Windows 7 / Windows 8
Prozessor: Pentium, 400 MHz oder höher, Speicher 128k
Soundkarte: voll duplexfähig, 1 x Line Out, 2 x Line In

Die **Installation der Programme** ist sehr einfach. Kopieren Sie die Dateien in ein Verzeichnis und entpacken Sie sie anschließend. Das ist alles! Alle erforderlichen Einträge in die Registry werden nach dem ersten Programmstart automatisch gesichert.

1.2 Erforderliches und nützliches Zubehör

Einleitend eine kleine Stückliste mit erforderlichem und nützlichem Zubehör, jeweils versehen mit ersten Hinweisen sowie Querverweisen auf vertiefende Stellen im Kompendium.

Soundkarten

Soundkarten können in drei Gruppen klassifiziert werden:

1. Standard-Soundkarten, die sich auf dem Motherboard des Computers befinden (Onboard)
2. Zusatz-Soundkarten für den PCI- oder ISA-Bus (Steckkarten)
3. Soundkarten, die über eine USB- oder Firewire-Schnittstelle mit dem Computer verbunden sind.

Prinzipiell sind alle drei Typen für den Einsatz von LIMP geeignet, sofern sie einen Ausgangskanal (Line Out) und zwei Eingangskanäle (Line In) besitzen. Bei den Onboard-Soundkarten in Laptops ist das in der Regel nicht gegeben, der Eingangskanal ist oft nur einkanalig (Mono) als Mikrofoneingang (Mic In) ausgeführt.

Leistungsverstärker

Unter der Voraussetzung, dass die Soundkarte einen Kopfhörerausgang (Phone Out) hat, ist für die Impedanzmessung kein Leistungsverstärker erforderlich.

Ansonsten ist jeder Leistungsverstärker mit linearem Frequenzgang und einer Leistung > 5 bis 10 Watt geeignet. Der Ausgangswiderstand R_A sollte < 0,05 Ohm sein. Achtung, verwenden Sie keine Verstärker mit virtueller Masse (Brückenverstärker) für Impedanzmessungen, das könnte Ihrer Soundkarte schlecht bekommen. Wenn Sie nicht sicher sind, welcher Bauart Ihr Verstärker ist, so erkundigen Sie sich besser vor dem ersten Einsatz beim Hersteller. Eine preiswerte Empfehlung, die oben genannte Bedingungen erfüllt - und zusätzlich einem mobilen Einsatz durch geringe Abmessungen entgegen kommt - ist der t.Amp PM40C von Thomann (siehe auch Kompendium, Kapitel 5.4).

ARTA-MessBox

Die ARTA-MessBox ist für Impedanzmessungen nicht erforderlich, erleichtert jedoch das Messleben ungemein. Beim Wechsel zwischen akustischen und elektrischen Messungen wird dann das lästige Umstöpseln von Kabeln durch das einfache Umlegen eines Kippschalters ersetzt (siehe auch Application Note Nr. 1).

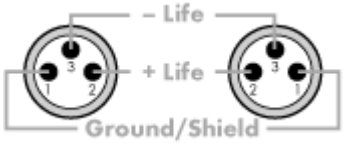
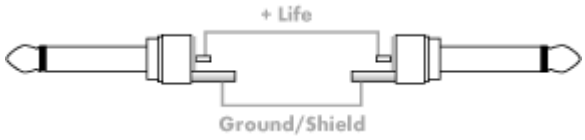
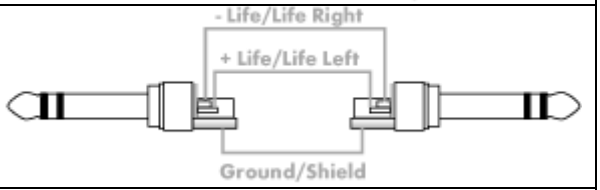
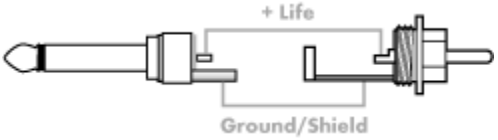
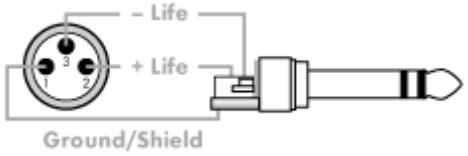
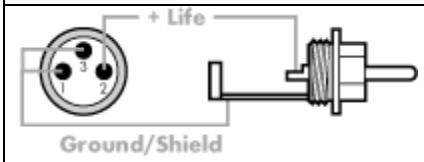
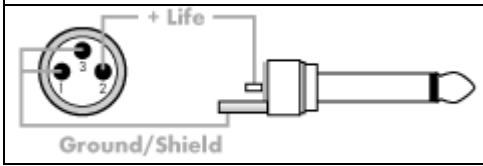
Multimeter (DMM)

Ein Multimeter ist für das Messen mit LIMP nicht erforderlich, jedoch für die Kalibrierung der ARTA-Messkette unabdingbar und darüber hinaus natürlich ein nützliches Werkzeug für den Messalltag. Sofern Sie noch kein Multimeter besitzen, sollten Sie sich idealerweise für ein sogenanntes True RMS Multimeter entscheiden. Das Angebot ist groß und auch unter 100 € gibt es bereits brauchbare Geräte.

Kabel

Zur Verbindung aller genannten Komponenten sind diverse Kabel erforderlich. Spätestens wenn eines fehlt, weiß man deren Wert zu schätzen. Achten Sie bei allen Verbindungen auf Qualität! Wackelkontakte, schlechte Schirmung etc. können einem das Messleben vergällen (s. auch Kompendium, Kap. 6.0.1). Bitte achten Sie darauf, dass alle Verbindungen nur so lang wie nötig sind!

1.3 Pinbelegung von NF-Kabeln und NF-Steckern

Unsymmetrisch	**Symmetrisch**
	
	
	
	
	

KLINKE STEREO Gehäuse: Masse (GROUND/ SHIELD) Spitze: Plus (LIFE) Ring: Minus (LIFE)	**XLR** Pin 1: Masse (GROUND/ SHIELD) Pin 2: Plus (LIFE) Pin 3: Minus (LIFE)

Bild: 1.3.1: Steckerbelegung von Verbindungskabeln

2. LIMP, Messprinzip und Messaufbau

2.1 Messprinzip und praktische Umsetzung

Das Prinzip der Impedanzmessung mit LIMP ist im Bild 2.1.1 dargestellt. Durch Messung der

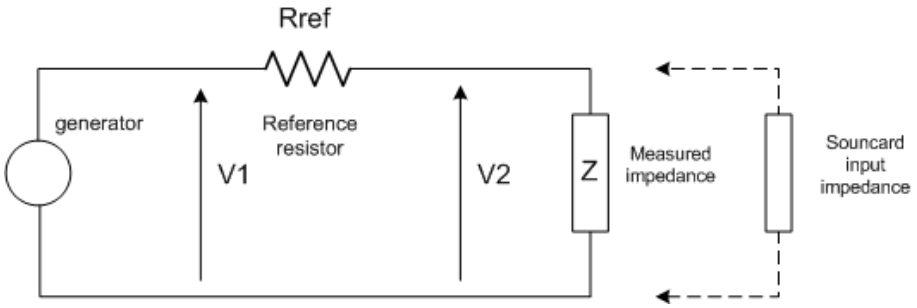


Bild 2.1.1: Prinzip der Impedanzmessung

Spannung U1 (Line IN, rechter Kanal) über Referenzwiderstand R_{REF} und Lautsprecher sowie U2 (Line IN, linker Kanal) über dem Lautsprecher ergibt sich die Impedanz $Z = R_{REF} \times U2(f) \div (U1(f) - U2(f))$.

Im LIMP-Originalhandbuch wird auf zwei Messaufbauten Bezug genommen:

- Impedanzmessung am Kopfhörerausgang der Soundkarte (Bild 2.1.2)
- Impedanzmessung mit Leistungsverstärker (Bild 2.1.5)

Im Folgenden werden diese beiden Varianten der Impedanzmessung beschrieben.

2.1.1 Impedanzmessung am Kopfhörerausgang der Soundkarte

Die einfachste Möglichkeit, eine Impedanzmessung ohne viel zusätzliches Equipment durchzuführen, ist die Nutzung des Kopfhörerausgangs der Soundkarte. Es wird lediglich ein Referenzwiderstand R_{Ref} sowie ein wenig Kabel benötigt.

Der Messaufbau ist Bild 2.1.2 zu entnehmen. Als Referenzwiderstand R_{Ref} wird im LIMP Originalhandbuch ein Wert von 100 Ohm empfohlen. Je nach Soundkarte sollte der Widerstand Werte zwischen 33 Ohm und 100 Ohm einnehmen.

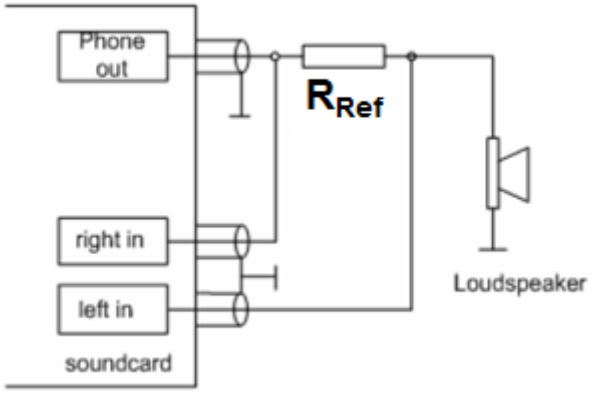


Bild 2.1.2: Impedanzmessung am Kopfhörer-Ausgang der Soundkarte

Der hohe Wert des Referenzwiderstandes ist der Tatsache geschuldet, dass Kopfhörerausgänge von Soundkarten in der Regel nicht für den Betrieb von Lautsprechern ausgelegt sind. Bild 2.1.3 zeigt den Impedanzverlauf eines gängigen Kopfhörers und eines Lautsprechers im Vergleich. Frei nach

dem Motto „wenig Ohm, viel Strom“ wird deutlich, dass ein Kopfhörerausgang schnell überfordert sein kann.

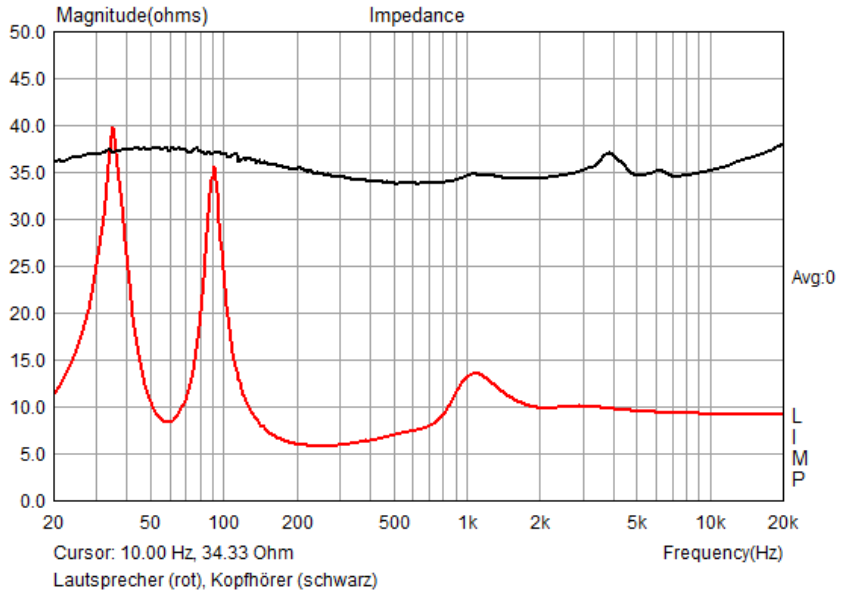


Bild 2.1.3: Impedanzverlauf Kopfhörer (schwarz) vs. Lautsprecher (rot)

Bild 2.1.4 zeigt die Spezifikation des Kopfhörerausgangs zwei gängiger Soundkarten. Die ESI UGM96 liefert eine max. Ausgangsspannung von +4 dBV = 1,0 * 10^(4/20) = 1,584 V, eine RME Fireface UC liefert +19 dBu = 0,775 * 10^(19/20) = 6,907 V.

Line- & Kopfhörer-Ausgang

- Type: Stereo 6.3mm Klinkenbuchse
- Max. Ausgangspegel: +4dBV
- THD+N: 0.003% A-gewichtet
- Ausgangsleistung: 100mW Max @ 32 ohm
- Impedanz: 32 ~ 600 ohm

Bild 2.1.4: Soundkarte Kopfhörerausgang, Spezifikation ESI UGM96

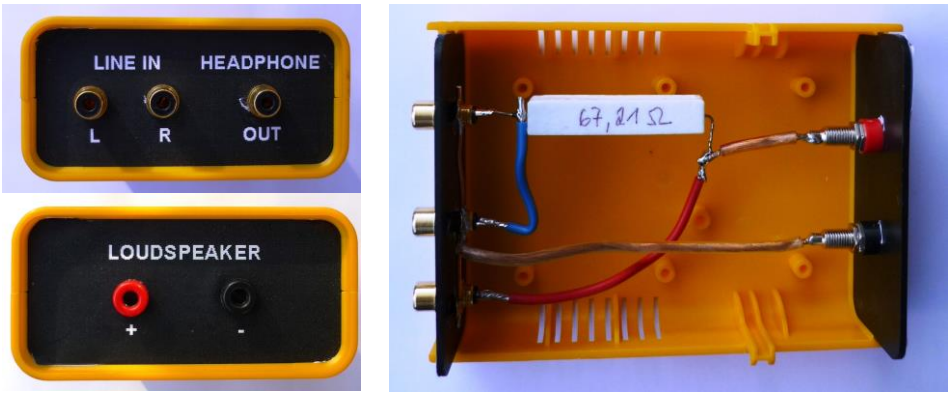


Bild 2.1.5: Praktische Umsetzung von Bild 2.1.2

Bild 2.1.5 zeigt die praktische Umsetzung von Bild 2.1.2. Eine derartige Ausführung ist nicht zwingend erforderlich, hilft jedoch bei der Vermeidung von Fehlern, z.B. der Beschädigung der Soundkarte.

2.1.2 Impedanzmessung mit Leistungsverstärker

Um die begrenzte Stromlieferfähigkeit eines Kopfhörerausgangs zu umgehen, kann er durch einen Leistungsverstärker ersetzt werden. Für die Impedanzmessung ist das nicht unbedingt erforderlich, für akustische Messungen aufgrund des höheren Leistungsbedarfs jedoch unabdingbar.

In dieser Anordnung (Bild 2.1.6) darf der Referenzwiderstand niederohmiger sein, die Empfehlung aus dem Originalhandbuch ist R_{Ref} = 27 Ohm.

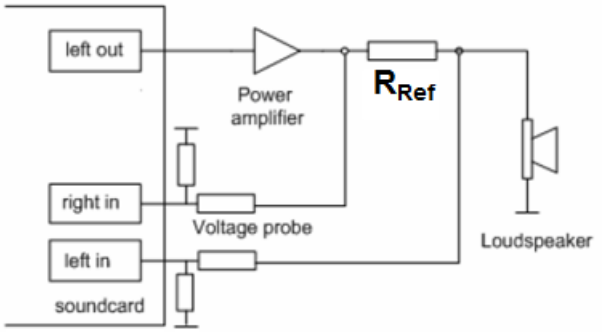


Bild 2.1.6: Impedanzmessung mit Leistungsverstärker.

Bei Verwendung eines Leistungsverstärkers muss beachten werden, dass die Spannung am Ausgang des Leistungsverstärkers erheblich höher sein kann als am Kopfhörerausgang und somit die Eingänge der Soundkarte übersteuert oder gar beschädigt werden können. Aus diesem Grunde ist es ratsam, die Soundkarten-Eingänge durch einen Spannungsteiler (Voltage Probe) abzusichern. Dazu folgendes Beispiel:

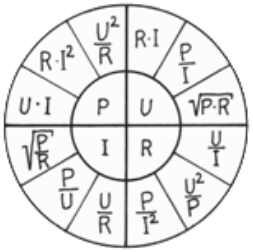
Hi-Z Instrumenteneingang

- Type: unsymmetrisch 6.3mm Klinke
- Max. Eingangspegel: +4.5dBV max
- THD+N: 0.003% A-gewichtet
- Impedanz: 500 kOhm

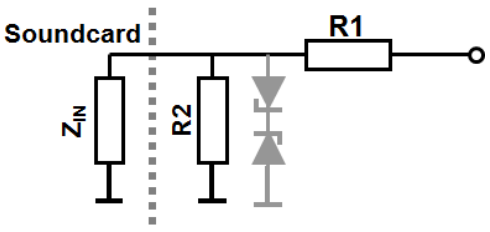
Bild 2.1.7: Soundkarte Line IN, Spezifikation ESI UGM96

Max. Eingangsspannung Soundkarte $U_{IN\ MAX}$ = +4,5 dBV = 1,0 * 10^(4,5/20) = 1,679 V RMS
Eingangsimpedanz der Soundkarte Z_{IN} = 500 kOhm
Leistung des Verstärkers P = 20 Watt

Unter Anwendung des ohmschen Gesetzes berechnet sich die maximale Ausgangsspannung an einer Lastimpedanz von Z = 8 Ohm wie folgt:



U = SQRT (P * Z)
U = SQRT (20*8) = 12,65 V
$G_{IN} = U_{IN\ MAX} / U_{OUT\ AMP\ MAX}$ = 1,679 / 12,65 = 0,1327 = -17,54 dB
Es ist also ein Spannungsteiler mit ca. 18 dB Abschwächung erforderlich.



$Rx = (Z_{IN} * R2) / (Z_{IN} + R2)$ [1]

$G = Rx / (R1 + Rx)$ [2]

$R1 = (Rx / G) – Rx$ [3]

Bei einer Eingangsimpedanz der Soundkarte von Z_{IN} = 500 kOhm und einem gewählten Wert für R2=10 kOhm berechnet sich R1 mit [1] und [3] wie folgt:

Rx = (500000 * 10000) / (500000 + 10000) = 9803,92 Ohm
R1 = (Rx/G) – Rx = (9803,92 / 0,1327) – 9803,92 = 64076,42 Ohm → 68 kOhm
G_{IN} = 9803,92 / (68000+9802,92) = 0,126 = -17,99 dB

Zur Bemessung des Spannungsteilers siehe auch Kapitel 6.

Die oben eingezeichneten Zener-Dioden (grau) sind nicht unbedingt erforderlich, bieten jedoch einen zusätzlichen Schutz für den Line IN Eingang der Soundkarte. Entscheiden Sie also in Abhängigkeit von Ihrer eigenen Risikobereitschaft über den Einsatz der Zener-Dioden (siehe hierzu auch [I]).

2.2 LIMP, Bedienung

Wie bei allen Programmen der ARTA-Familie sind auch bei LIMP die wesentlichen Befehle und Operationen in der oberen Menüleiste in der Eröffnungsmaske (Bild 2.2.1) enthalten.

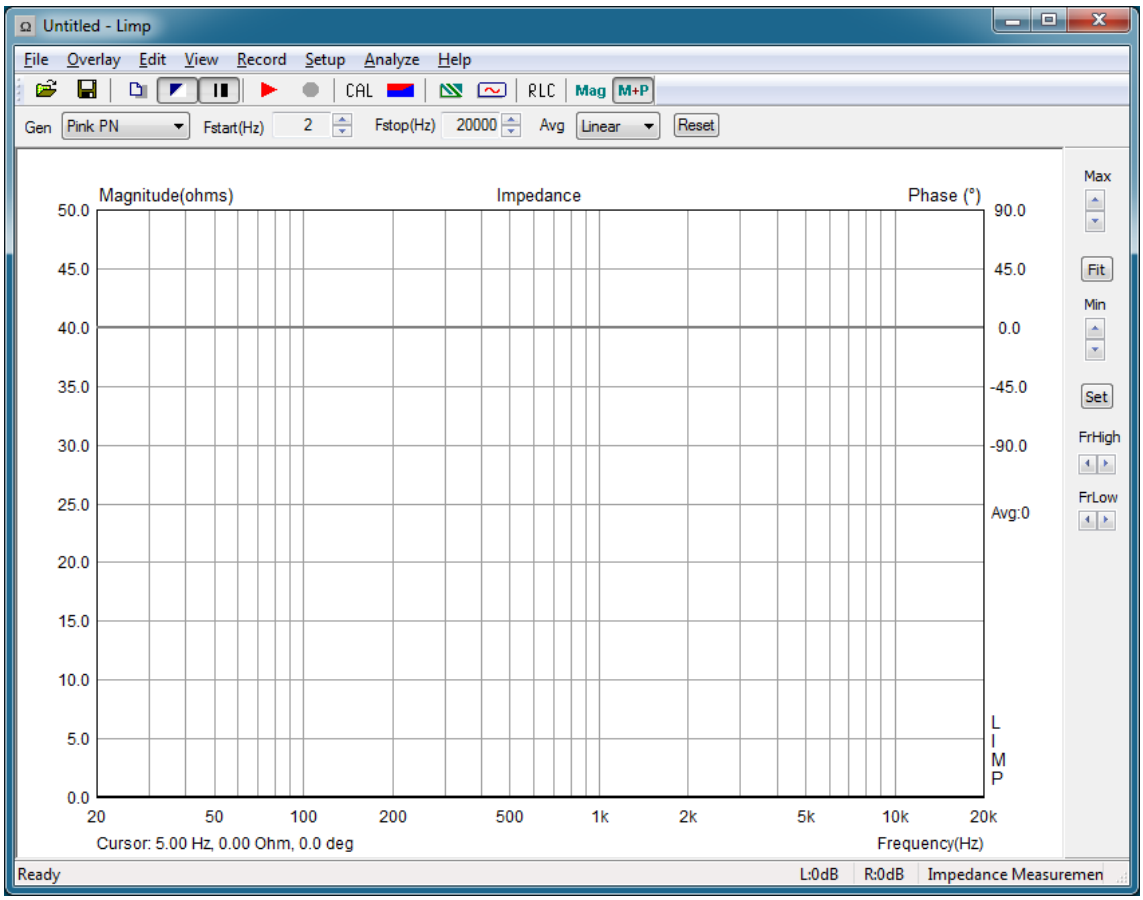


Bild 2.2.1: Eröffnungsmaske von LIMP

Die Symbolleiste in der Eröffnungsmaske von LIMP enthält alle wesentlichen Bedienelemente und ist weitgehend selbsterklärend (Bild 2.2.2). Die Systematik entspricht der des Schwesterprogramms ARTA.

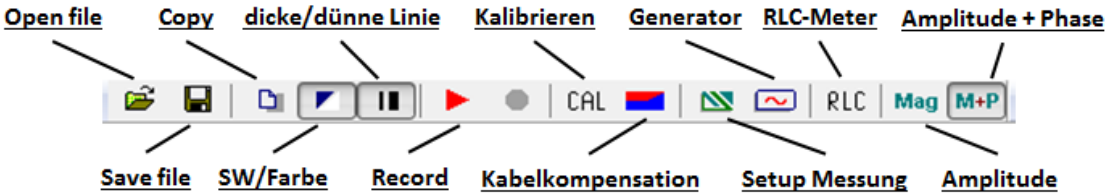


Bild 2.2.2: Symbolleiste in der Eröffnungsmaske von LIMP

Weitere Erläuterungen werden im folgenden Text an den entsprechenden Stellen gegeben.

2.2.1 Grundeinstellung von LIMP

Vor der ersten Messung mit LIMP sind einige Einstellungen zu prüfen bzw. vorzunehmen:

a. Soundkarte und Ein- und Ausgabekanäle in „Soundcard Setup“ wählen
b. Messparameter im „Measurement Setup“ einstellen, R_{Ref} eingeben
c. Pegel der Soundkarte im „Generator Setup“ einstellen
d. System Kalibrieren im Menü „Calibrate Input Channels“

Ad a.) Im Soundcard Setup (Bild 2.2.3) ist zu prüfen, ob die Soundkarte erkannt wurde. Die Betätigung des Menüpunktes „Soundcard Driver“ zeigt Ihnen vorhandene Karten an. Wann immer für Ihre Soundkarte verfügbar, nutzen Sie den ASIO Treiber. Wählen Sie den Treiber sowie den Eingangs- und den Ausgangskanal für Ihre Soundkarte.

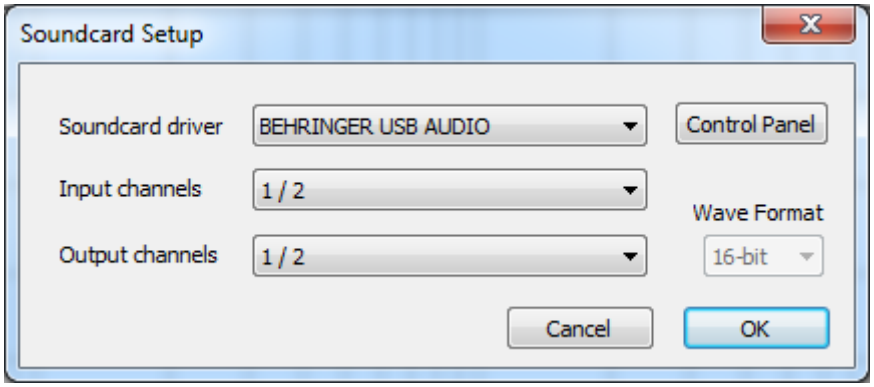


Bild 2.2.3: Soundcard Setup von LIMP

Mit dem Control Panel können - je nach gewähltem Treiber - entweder der Windows Mixer oder das ASIO Control Panel geöffnet werden. Für LIMP sind hier keine weiteren Einstellungen vorzunehmen.

Ad b.) Im Measurement Setup ist in der Regel nur der Wert des Referenzwiderstandes einzugeben, ansonsten sind die Default-Werte gut voreingestellt. Das Measurement Setup von LIMP hat drei Bereiche:

- Measurement Config (Links)
- Stepped Sine Mode (Mitte)
- FFT Mode - Pink Noise Excitation (Rechts)

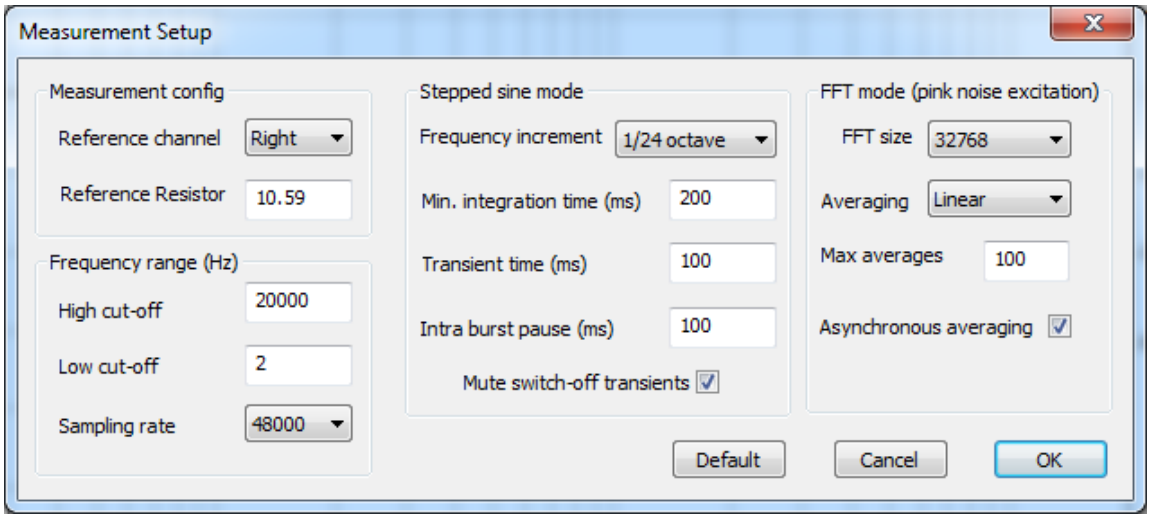
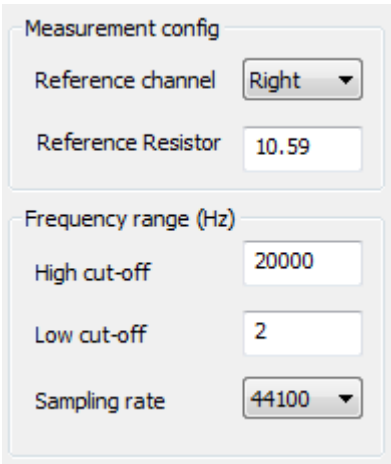


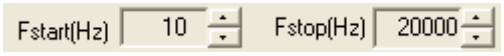
Bild 2.2.4: Measurement Setup von LIMP

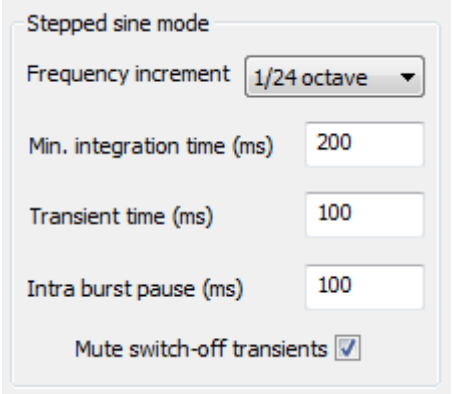


Im Bereich Measurement Config werden die allgemeinen Messparameter festgelegt:

- Referenzkanal: Default ist der rechte Eingangskanal
- Referenzwiderstand: Siehe Abschnitt. 2.1.1 bzw. 2.1.2. **Achtung, den Referenzwiderstand bitte genau ausmessen.**
- Obere Frequenzgrenze: Stopwert, siehe unten
- Untere Frequenzgrenze: Startwert, siehe unten

Die Frequenzgrenzen sind auch über die obere Menüleiste zu steuern.

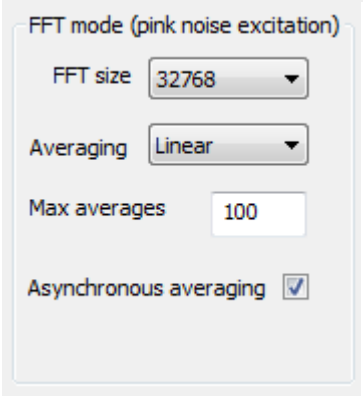




Im Bereich Stepped Sine Mode werden die Parameter für die Anregung mit gestuftem Sinus definiert.

Alle Parameter dieses Bereiches sind im ARTA Kompendium, Abschnitt 9.1 erläutert. Die eingestellten Default-Werte (siehe links) müssen nicht verändert werden.

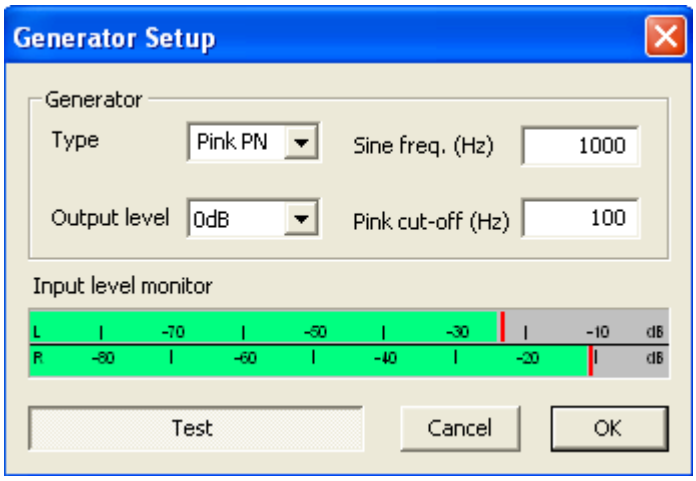
Mute switch-off transients: blendet die „Knackser“ am Ende eines jeden Sinuspakets aus.



Im Bereich FFT Mode werden die Parameter für die Anregung mit rosa Rauschen definiert.

- FFT Size: Anzahl der Werte für die FFT (Auflösung)
- Averaging: Art der Mittelung (keine, linear, exponentiell)
- Max Averages: maximale Zahl der Mittelwertbildungen
- Asynchronous Averaging: asynchrone Mittelung an/aus

Ad c.) Bevor es ans Messen geht, ist zu überprüfen, ob der eingestellte Ausgangspegel nicht zur Übersteuerung der Eingangskanäle führt. Dazu ist das „Generator Setup“ gut geeignet.



Generator

- Anregungsart: PN oder Stepped Sine
- Ausgangspegel: 0 bis -15 dB
- Frequenz bei Sinusanregung
- Eckfrequenz bei Anregung mit Rauschsignal

Input Level Monitor
Durch Drücken von Test wird das oben eingestellte Signal gestartet und im Peak Level Meter angezeigt. Sollte die Anzeige rot oder gelb sein, ist der Pegel zu reduzieren.

Dabei ist zu beachten, dass der Energiegehalt der beiden Anregungssignale PN und Sinus sehr unterschiedlich ist, d.h. bei Wechsel der Anregungsart sollte der Pegel neu geprüft werden. Im Menü Generator Setup sind alle erforderlichen Einstellungen möglich.

Ad d.) Im Menü „Calibrate Input Channels“ wird die Kalibrierung der Soundkarte durchgeführt. Der Vorgang selbst ist äußerst simpel. Nach Prüfen der Einstellwerte und des Pegels im Abschnitt

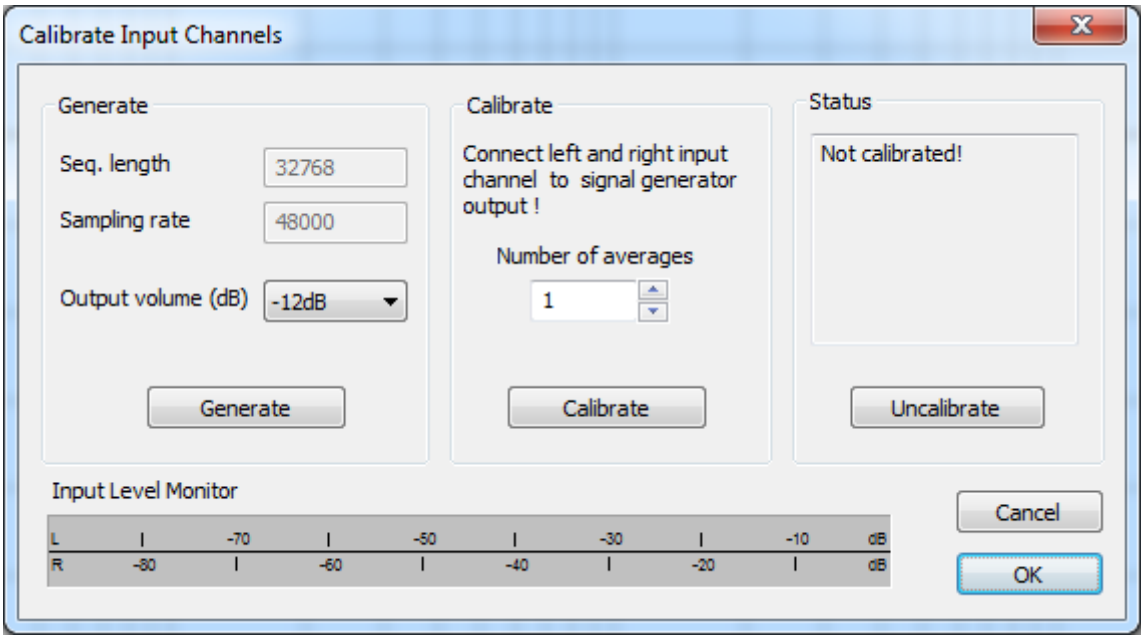
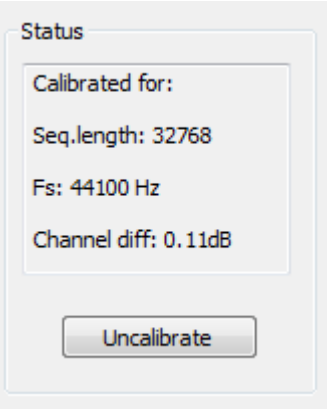


Bild 2.2.5: Measurement Setup von LIMP

„Generate“ wird durch Betätigung des Buttons „Calibrate“ die Kalibrierung der beiden Eingangskanäle vorgenommen. Nach Abschluss der Kalibrierung wechselt der Status von „Not Calibrated!“ auf „Calibrated for“.



Achtung, die Kalibrierung gilt jeweils nur für die gewählte Einstellung. Wenn Sie also die Sampling Rate oder die Länge der FFT Sequenz wechseln, müssen Sie neu kalibrieren.

Die ausgewiesene Kanaldifferenz – in diesem Beispiel 0,11 dB – wird rechnerisch ausgeglichen. Wenn die Differenz > 2 dB ist, gibt es eine Fehlermeldung (Bild 2.2.6).

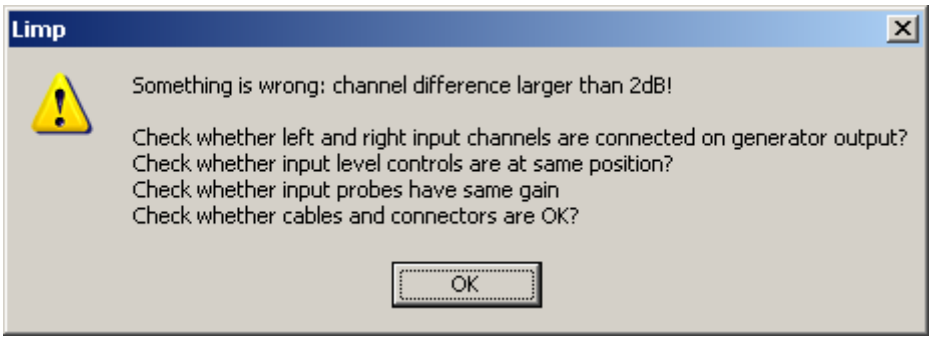


Bild 2.2.6: Fehlermeldung beim Kalibrieren von LIMP

Die Fehlermeldung beinhaltet Hinweise auf mögliche Ursachen für die Kanaldifferenzen:

- Richtiger Referenzkanal (siehe Bild 2.1.2, Bild 2.1.6, Bild 2.2.4)?
- Gleiche Verstärkung für beide Eingangskanäle (siehe Kompendium, Abschnitt 2)?
- Beide Spannungsteiler gleich (sofern vorhanden)?
- Kabel und Verbindungen in Ordnung?

2.2.2 Kompensation der Messleitungen

Beim Messen gilt der Grundsatz „Alle Verbindungen so kurz wie möglich“. Wer das beherzigt, kann diesen Abschnitt fast überlesen.

Auch die kürzeste Leitung aus Kupfer hat einen Widerstand, nämlich 0,017241 $\Omega \cdot mm^2/m$. Bild 2.2.7 zeigt den Impedanzgang unterschiedlicher Messleitungen aus Kupfer. Von oben nach unten sind 5,5 m als 2,5 mm^2, 4 m als 4 mm^2 und 0,9 m als 4 mm^2 (rot via ARTA MessBox an R_{Ref} = 20 Ohm, blau via Kopfhörerausgang an R_{Ref} = 68 Ohm) abgebildet. Je nach Länge und Querschnitt sind zwischen 0,03 Ω bis 0,23 Ω zu verzeichnen. Wer es nachrechnet, wird feststellen, dass die gemessenen Werte nicht gänzlich durch den reinen Leitungswiderstand zu erklären sind. Übergangswiderstände an Schaltern, Klemmen sowie Bananensteckern leisten ebenfalls einen Beitrag, wie am Beispiel der ARTA-Messbox im Vergleich zur Kopfhörerversion zu sehen ist.

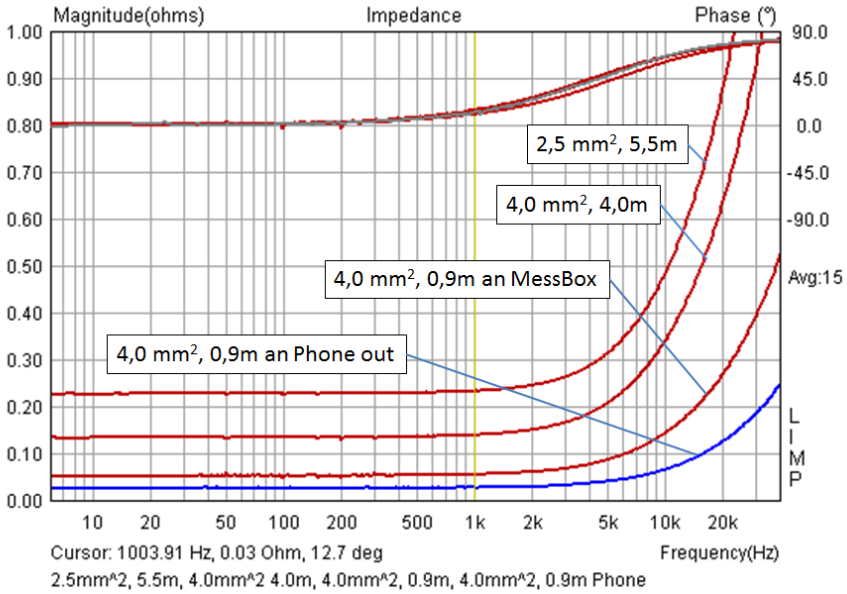
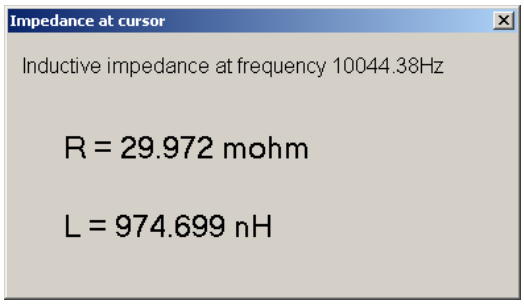


Bild 2.2.7: Impedanz von diversen Messleitungen



Mittels des Menüs „Cable Impedance Compensation“ lassen sich die Kabelwiderstände kompensieren. Dazu wird die kurzgeschlossene Messleitung gemessen. Es sollte ein ähnliches Ergebnis wie in Bild 2.2.7 auf dem Monitor erscheinen. Setzen Sie den Cursor in etwa bei ca. 45° Phasenwinkel und betätigen den Button RLC in der Hauptmenüleiste. Dann erscheint das rechts gezeigte Menü „Impedance at Cursor“ und weist den Widerstand und die Induktivität an der Cursorposition aus. Diese Werte werden in das Menü „Cable Impedance Compensation“ übertragen (Bild 2.2.8). Beachten Sie dabei bitte die Einheiten! Sofern die Checkbox „Automatically subtract cable impedance from measured Impedance“ aktiviert ist, werden die Korrekturen automatisch in jede Messung eingefügt.

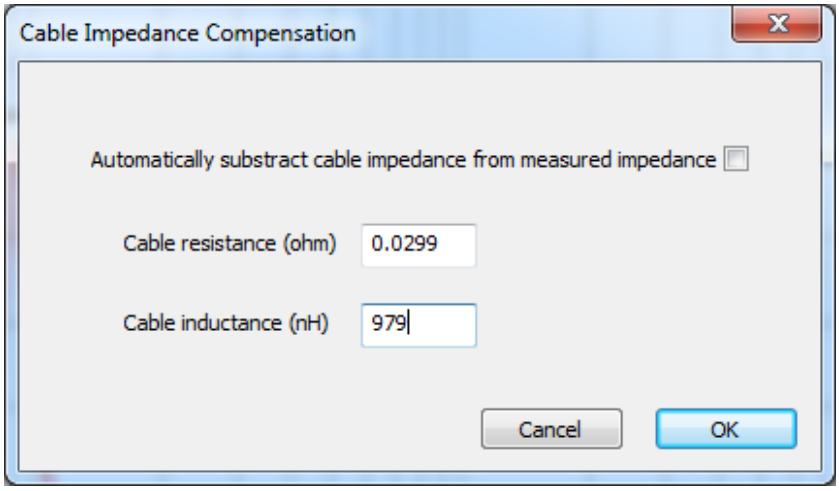


Bild 2.2.8: Menü zur Kabelkompensation

Eine zweite Möglichkeit der Kompensation von Messleitungen besteht mittels der Funktion „Subtract Overlay“. Hierbei wird eine „Nullmessung“ am Messkabel als Overlay gespeichert und nach jeder Messung vom Ergebnis subtrahiert.

3. LIMP, Ermittlung der Thiele-Small-Parameter

LIMP unterstützt die Ermittlung der TSP nach zwei unterschiedlichen Methoden:

- im Testgehäuse mit bekanntem Volumen (Volumenmethode, Bild 3.1.a)
- durch Beschweren der Membran mit bekannter Zusatzmasse (Massemethode, Bild 3.1b)

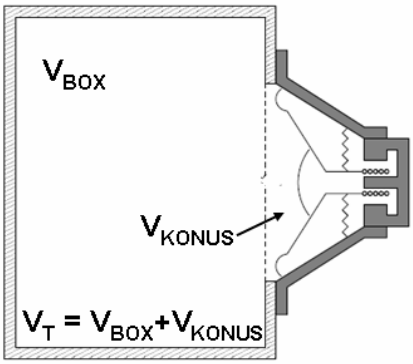


Bild 3.1a: Volumenmethode

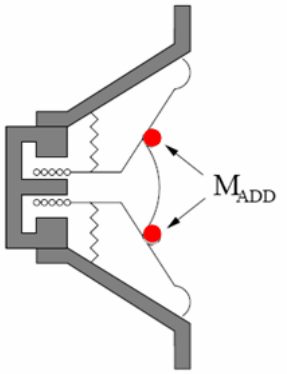


Bild 3.1b: Massemethode

Prinzipiell sind beide Methoden gleichwertig, jedoch sollte die Volumenmethode immer dann angewendet werden, wenn die Resonanzfrequenz des Lautsprechers sehr niedrig ist. Bei Anwendung der Massemethode könnte die Resonanzfrequenz zu so tiefen Frequenzen verschoben werden, dass der lineare Messbereich der Soundkarte verlassen wird.

3.1 Vorbereitung der TSP-Messung

Bevor es ans Messen geht, lassen Sie uns noch einige Überlegungen zu den Rahmenbedingungen anstellen, indem wir dem Master Class Seminar „Loudspeaker Parameters“ von Neville Thiele und Richard Small aus dem Jahre 2008 [7] und einer Herstellerempfehlung [9] folgen. Dort wurden - neben anderen Themen - die Bedingungen zur Ermittlung von TSP-Parametern (Signalstärke, Messlage (horizontal, vertikal), Einbau- oder Einspannbedingungen) und Break-In diskutiert.

3.1.1 Stärke des Anregungssignals

Bedenken Sie, dass die TSP als „Kleinsignalparameter“ deklariert sind! Richard Small empfiehlt, den Pegel des Messsignals soweit zu beschränken, dass gerade noch ein sauberes Messsignal empfangen wird. In der Technical Note [9] von SB Acoustics wird empfohlen, Tiefmitteltöner mit circa 1 Volt an der Resonanzfrequenz zu messen. Der Standard AES2-2012 [8] empfiehlt 0,1 Volt als typische Messspannung.

In diesem Zusammenhang muss auch beachtet werden, dass der Energiegehalt der in LIMP zur Verfügung stehenden Messsignale (PN, Stepped Sine) unterschiedlich ist. Bild 3.2 zeigt die Impedanzverläufe für beide Anregungssignale bei identischer Verstärkung. Die rote Kurve gilt für die Anregung mit Sinus und die schwarze Kurve für das Rauschsignal. Es ist deutlich zu sehen, dass das energiereichere Sinussignal erwartungsgemäß zu einer tieferen Resonanzfrequenz führt.

Es ist bekannt, dass sich die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Anregungsamplitude verändert (C_{MS} ist keine Konstante). Insofern sollte nicht erwartet werden, dass unterschiedliche Anregungsspannungen oder gar Messmethoden identische Ergebnisse liefern.

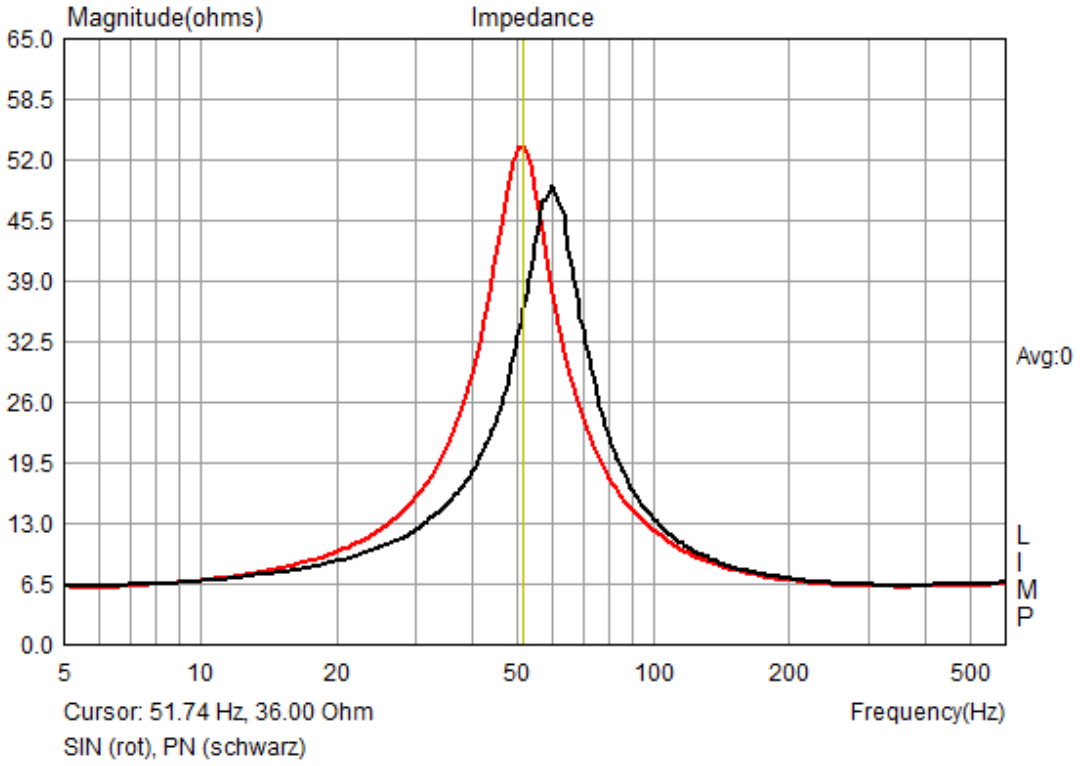


Bild 3.2: Impedanzgänge bei unterschiedlicher Anregung (rot = Sinus, schwarz = PN)

Wichtig ist hingegen, dass der unter den jeweiligen Bedingungen ermittelte Parametersatz in sich schlüssig ist und sich damit zur Berechnung/Simulation eignet. Bei Hifi-Selbstbau wird dazu ein nützliches Tool namens „TSP-Check“ angeboten [12]. Ansonsten ist der Vergleich der Quotienten fs/Qts ein erster Hinweis, ob sich die beiden Parametersätze im Simulationsergebnis deutlich unterscheiden werden.

3.1.2 Einspielen - Break In

Die AES2-2012 [9] sagt hierzu „Es ist wahrscheinlich, dass vor der Messung der TSP der Lautsprecher mehrere Minuten betrieben werden muss, um ein Driften der Resonanzfrequenz zu stoppen“. SB Acoustics [7] spielt ihre Lautsprecherchassis vor der TSP-Messung ca. 10 Minuten mit einem Sinussignal bei 0,8 fs ein. Die Spannung wird dabei so gewählt, dass der Lautsprecher im Bereich der maximalen Auslenkung betrieben wird. Nach dem Einspielen ist darauf zu achten, dass der Lautsprecher genügend Zeit bekommt, um wieder auf Raumtemperatur abkühlen zu können. Andere Quellen berichten auch von einer mehrstündigen Einspielzeit. Vance Dickason [2] sagt hingegen, dass das Einspielen von Lautsprecherchassis lediglich für die (Früh)Erkennung von verdeckten Defekten erforderlich ist.

3.1.3 Einspannbedingungen und Messlage

Unter welchen Bedingungen sollten die TSP gemessen werden? Fest eingespannt, am Faden hängend, lose in der Hand? Richard Small empfiehlt eine feste Einspannung in Einbaulage (siehe Bild 3.5, linkes Teilbild). Er zeigt in seinem Vortrag beispielhaft, was passiert, wenn dem Masse-Feder-System Lautsprecher unbewusst weitere Elemente beigefügt werden.

Bild 3.3 zeigt ein nachgestelltes Messbeispiel, in dem Chassis auf unterschiedlichen Unterlagen (hart = rot; Schaumstoff = blau) gemessen wurden. Das Chassis im linken Teilbild hat eine Membranmasse von 11g und das im rechten Teilbild von 43g. Es ist sehr schön zu sehen, dass durch die „Zuschaltung“ der weichen, federnden Unterlage eine zusätzliche Resonanz erzeugt wird.

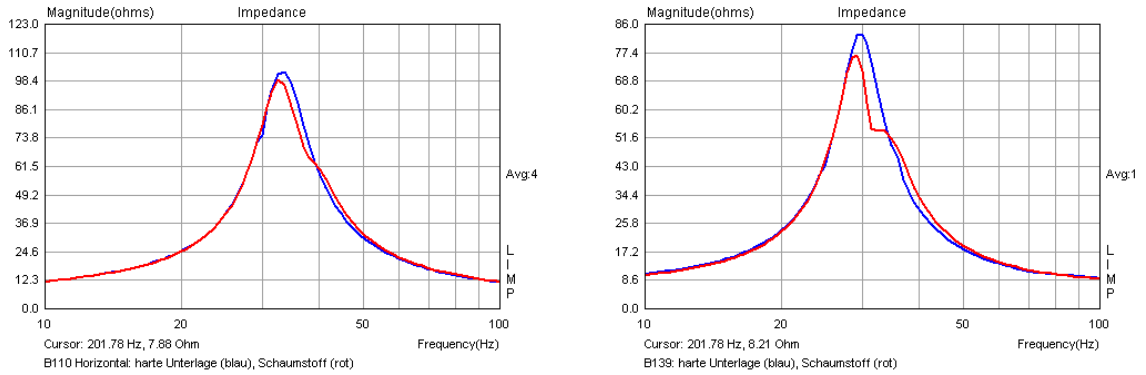


Bild 3.3: Einfluss der Messunterlage für zwei Lautsprecher (rot = Schaumstoff, blau = MDF)

Wenn schon in vertikaler Lage gemessen wird, dann sollte zumindest eine feste Unterlage gewählt werden. Ferner sollte bei dieser Lage natürlich darauf geachtet werden, dass eine eventuell vorhandene Polkernbohrung frei atmen kann.

Bild 3.4: Messlage bei der Messung der TSP

Bezüglich der Auswirkung der Messlage (horizontal, vertikal) auf die TSP des Chassis gibt es in Foren etliche Diskussionen. Fakt ist, dass sich in vertikaler Lage - bedingt durch die Schwerkraft - eine Verschiebung der Nulllage der Schwingspule ergibt. Ob das von praktischer Bedeutung ist, hängt von den Parametern des Lautsprechers ab. Die wirkende Kraft kann mit $F=m \cdot g$ und $g=9{,}81 m/s^2$ ermittelt werden.

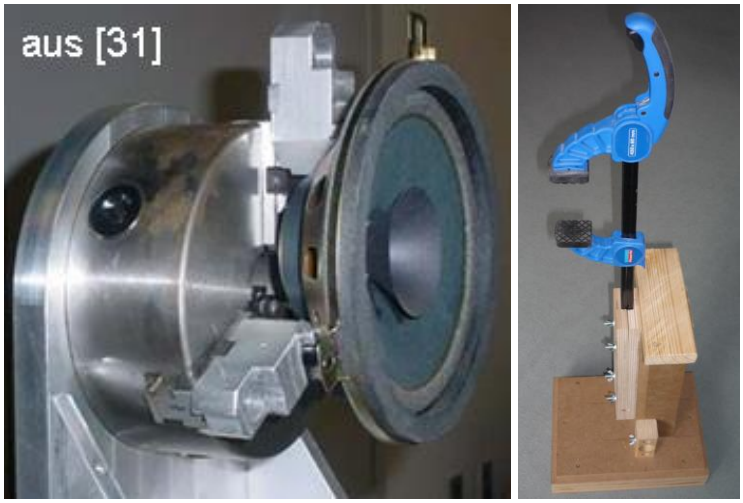


Bild 3.5: Einspannvorrichtungen für TSP Messung

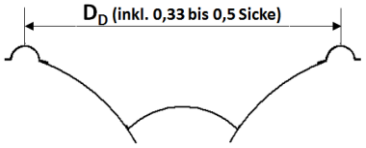
Richard Small und andere Autoren empfehlen, die Chassis in Einbaulage zu messen, also mit horizontaler Lautsprecherachse [7], [5].

Insofern sollten zumindest diejenigen, die sich dauerhaft dem Hobby Lautsprecherbau verschreiben wollen, den Bau einer einfachen Haltevorrichtung überdenken, in der sowohl die „normale Einbaulage“ als auch eine feste, nicht nachgiebige Befestigung realisierbar ist. Da auch hier die Gesetze der Physik gelten (actio = reactio), ist zur Erfüllung der letztgenannten Forderung ein wenig Masse erforderlich.

Im ARTA Hardware & Tools Manual, aber auch in den einschlägigen Foren, findet man hierzu diverse mehr oder minder einfach nachzubauende Beispiele. Relativ einfach und preiswert in der Umsetzung ist die Lösung in Bild 3.5, rechts.

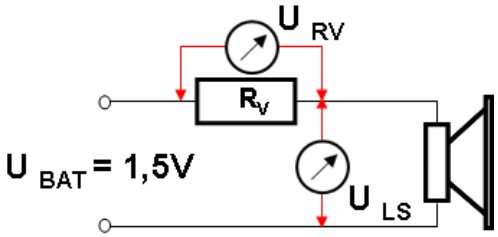
3.1.4 Ermittlung S_D

Für die Berechnung der TSP muss die effektive Membranfläche SD oder der effektive Membrandurchmesser D_D bekannt sein. Da neben der Membran auch ein Teil der Sicke mitschwingt, ist dieser Anteil mit zu berücksichtigen. Üblich ist die Einbeziehung von einem Drittel bis zur Hälfte der Sicke.



3.1.5 Messung von R_E

Der Ermittlung des Gleichstromwiderstandes R_E der Schwingspule kommt hinsichtlich der Bestimmung der TSP einige Bedeutung zu. Wenn Sie nicht sicher sind, ob Ihr Multimeter/LCR-Meter genau genug ist, können Sie sich mit dem folgenden Trick behelfen. Selbst mit einem sehr einfachen Multimeter lassen sich mit dieser Methode hinreichend hohe Genauigkeiten erzielen:



$$R_{DC} = \frac{R_V * U_{LS}}{U_{RV}}$$

- Schalten Sie einen bekannten Widerstand R_V (z.B. 8,2 Ohm ¼ Watt, 1%) und den Lautsprecher in Reihe
- Klemmen Sie eine 1,5 V Batterie an
- Messen Sie mit einem Multimeter die Spannung U_{RV} über dem Widerstand R_V und die Spannung U_{LS} über dem Lautsprecher
- Der Gleichstromwiderstand des Lautsprechers berechnet sich wie folgt $R_{DC} = R_V \cdot U_{LS} / U_{RV}$

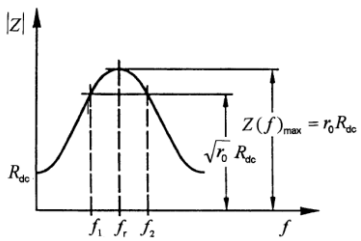
Beispiel:

4 Ohm Tieftöner
Gewählt: R_V = 4.7 Ohm,
Gemessen: U_{RV} = 0.8368 V, U_{LS} = 0.5591 V
Berechnet: R_{DC} = 4.7 * 0,5591 / 0.8368 = 3.14 Ohm (Herstellerangabe = 3.10 Ohm)

Hinweis: Ab der Version 1.8 bietet LIMP eine Option zur Ermittlung von R_E aus dem Impedanzverlauf (siehe hierzu Abschnitt 3.2)

3.2 Lautsprechermodelle zur TSP-Ermittlung

Ab der Version 1.8 bietet LIMP für die Ermittlung der TSP – neben der rechts gezeigten klassischen Methode [2, 10, 11] – weitere Funktionalität für die Ermittlung der TSP. Detaillierte Informationen zu den Hintergründen sind [10] zu entnehmen. Im Folgenden sollen die Erweiterungen kurz erläutert werden. Dazu schauen wir uns die Maske „Loudspeaker Parameters“ an.



Im Bereich „User Input“ müssen die extern zu ermittelnden Basisparameter in Abhängigkeit von der gewählten Methode (Masse oder Volumen) eingegeben werden (siehe auch 3.1.4, 3.1.5).

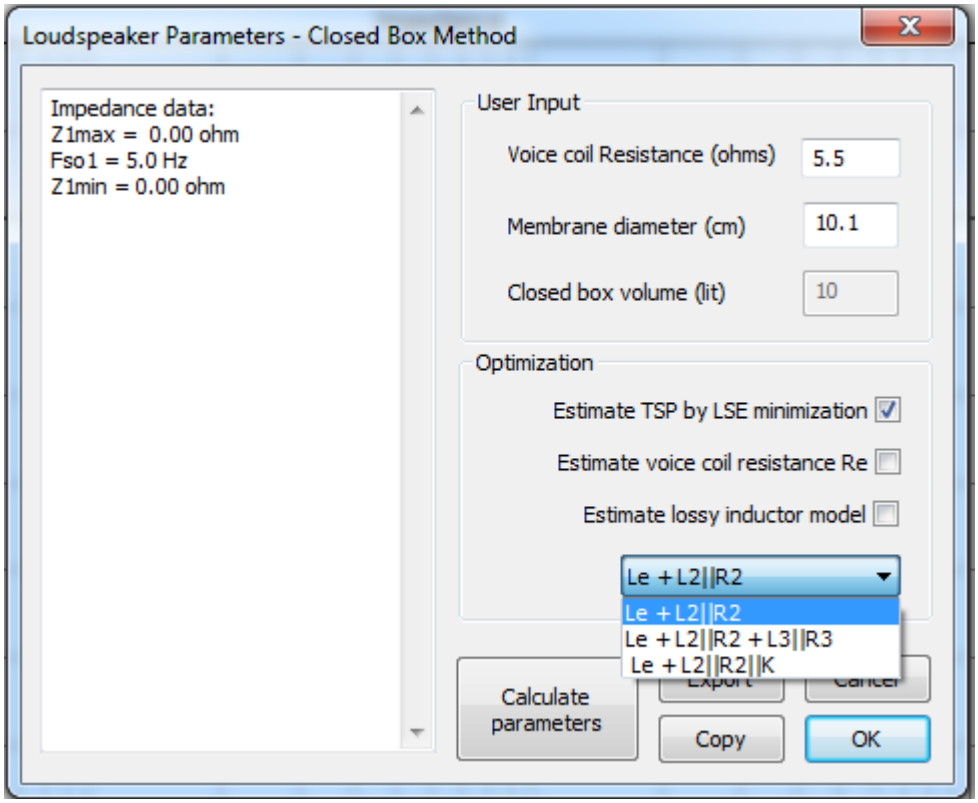


Bild 3.6: Menü Loudspeaker Parameters (hier Closed Box)

Im Bereich Optimization befinden sich 3 Checkboxen und ein Drop-Down-Feld. Über die Checkboxen wird die Art der Optimierung gewählt:

- Estimate TSP by LSE minimization
- Estimate Voice Coil Resistance Re
- Estimate lossy inductor model

Sofern keine der Checkboxen aktiviert ist, wird die klassische Methode zur Ermittlung der TSP angewendet (siehe LIMP-Handbuch, Abschnitt 5.2.2).

Wird Checkbox „TSP by LSE minimization“ aktiviert, so erfolgt die Anpassung an die Impedanzkurve durch nichtlineare Optimierung. Die Güte der Optimierung kann grafisch durch Betätigung der Funktionstaste F3 kontrolliert werden (siehe Bild 3.8a oder 3.8b).

Wird die Checkbox “Voice Coil Resistance R_E“ aktiviert, ermittelt LIMP aus dem gemessenen Impedanzverlauf den Gleichstromwiderstand R_E der Schwingspule. Dies ist besonders interessant,

wenn kein Ohmmeter/Multimeter zur Verfügung steht. Achtung, der per aktivierter Checkbox ermittelte Wert hat Vorrang vor dem eingegebenen Wert für R_E.

Durch Aktivierung der Checkbox „Lossy Inductor Model“ kommt das im Drop-Down-Feld gewählte Modell für die Schwingspuleninduktivität Z_{LE} für die Optimierung zur Anwendung.

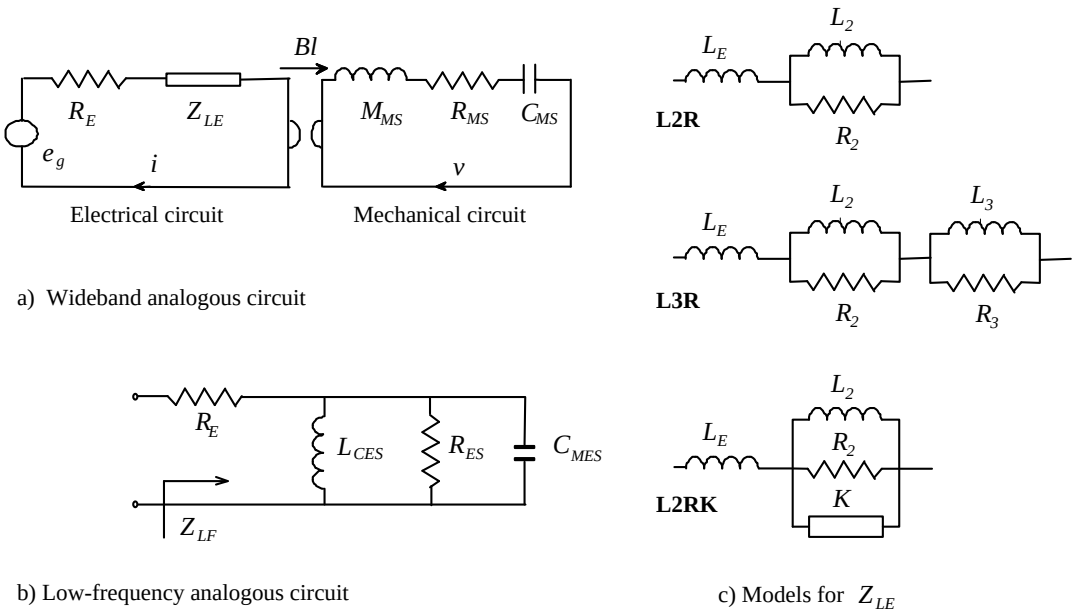
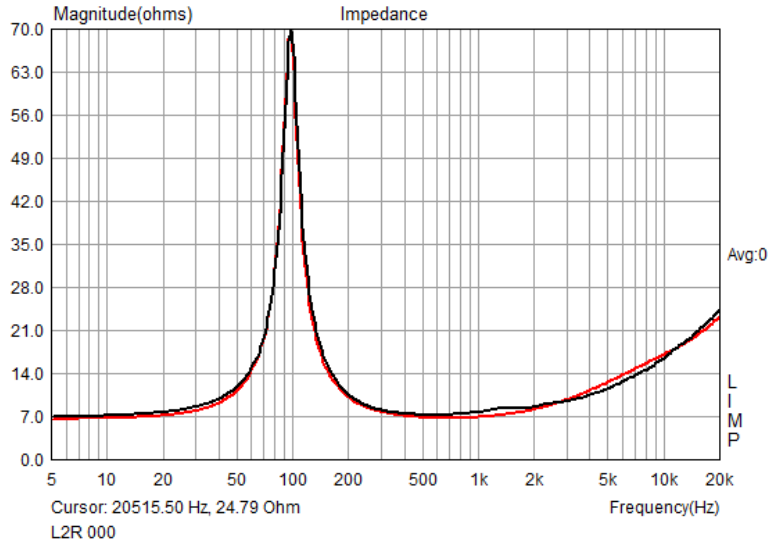


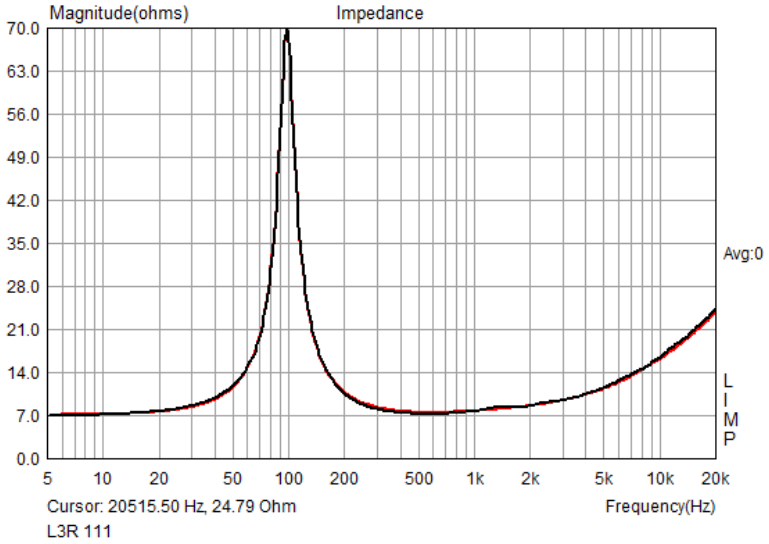
Bild 3.7: Ersatzschaltbild eines Lautsprechers mit verschiedenen Modellen für Z_{LE}

Dafür stehen drei unterschiedliche Modelle zur Verfügung (Bild 3.7c, Models for Z_{LE}). Interessant ist diese Ergänzung für diejenigen, die mit Ersatzschaltbildern in der Simulation operieren, da sich die Güte der Abbildung des Impedanzverlaufs über den gesamten Frequenzbereich deutlich verbessert.



Loudspeaker Parameters
Fs = 96.94 Hz
Re = 6.60 ohms[dc]
Qt = 0.51
Qes = 0.56
Qms = 5.37
Mms = 2.25 grams
Rms = 0.255123 kg/s
Cms = 0.001197 m/N
Vas = 1.72 liters
Sd= 31.97 cm^2
Bl = 4.011855 Tm
ETA = 0.27 %
Lp(2.83V/1m) = 87.22 dB
fs/Qt = 190,08

Bild 3.8a: TSP und Güte der Anpassung im Modell **L2R**, alle Optimierungsparameter **inaktiv**



Loudspeaker Parameters
Fs = 97.66 Hz
Re = 7.07 ohms[dc]
Qt = 0.53
Qes = 0.59
Qms = 5.20
Mms = 1.97 grams
Rms = 0.243228 kg/s
Cms = 0.001369 m/N
Vas = 1.97 liters
Sd= 31.97 cm^2
Bl = 3.902635 Tm
ETA = 0.31 %
Lp(2.83V/1m) = 87.55 dB
fs/Qt = 184,26

Bild 3.8b: TSP und Güte der Anpassung im Modell **L3R**, alle Optimierungsparameter **aktiv**

Wie wir sehen, unterscheiden sich die Ergebnisse je nach gewähltem Modell geringfügig. Der Quotient fs/Qt differiert um ca. 3%, die Ergebnisse für Vas weichen um ca. 13% voneinander ab. Was hat das nun für Auswirkungen auf die Abstimmung des Lautsprechers?

Bild 3.8c zeigt eine AJH-Simulation mit den Parametersätzen aus Bild 3.8a (Modell L2R 000 = schwarz) und Bild 3.8b (Modell L3R 111 = rot). Die Interpretation der Bedeutsamkeit der Unterschiede, die sich aus den zwei Parametersätzen ergeben, bleibt dem Leser überlassen..

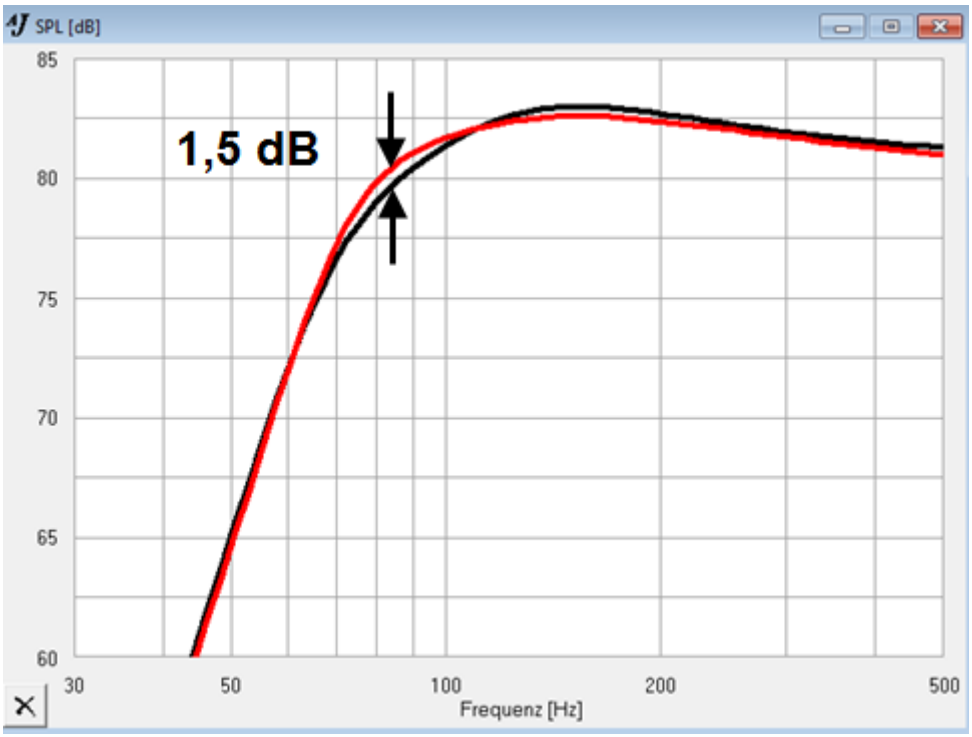


Bild 3.8c: Simulationsergebnisse für Parametersätze aus Bild 3.8a und Bild 3.8b

3.3 TSP-Ermittlung, Volumenmethode

Die Prozedur zur Ermittlung der Thiele-Small-Parameter nach der Volumenmethode läuft wie folgt:

1) Kalibrieren (siehe Abschnitt 2.2.1)

2) Testvolumen festlegen
In Abhängigkeit vom Durchmesser (Membranfläche) des zu messenden Lautsprechers ist ein Testgehäuse mit passendem und bekanntem Volumen zu beschaffen. Eine grobe Abschätzung des erforderlichen Volumens für das Testgehäuse kann mit nachfolgender Tabelle vorgenommen werden. Es muss jedoch nicht extra gefertigt werden, denn jedes vorhandene Gehäuse in dieser Größenordnung ist geeignet, vorausgesetzt es führt zu einer Resonanzverschiebung des Lautsprechers im Bereich zwischen 20% und 50%. Die Resonanzverschiebung wird durch LIMP kontrolliert und angezeigt (s. Bild 3.9a).

D [cm]	VT [Ltr]
8	3
10	5
13	7
17	12
20	17
25	30
30	55
38	140

Beispiel: Laut Tabelle soll für ein 17 cm Chassis das Volumen des Testgehäuses in etwa 12 Liter betragen. Bei der Eingabe des Testvolumens (Closed Box Volume) in der Maske „Closed Box Method“ ist zu berücksichtigen, dass zu dem exakten Volumen der Testbox das Volumen des Lautsprecherkonus addiert werden muss (s. Bild 3.1a).

3) Messung des Lautsprechers “free air”

4) Die free-air-Messung mit **Overlay → Set** speichern (Kurve wird gelb)

5) Die Messung des LS im Testgehäuse durchführen (s. Bild 3.1a)

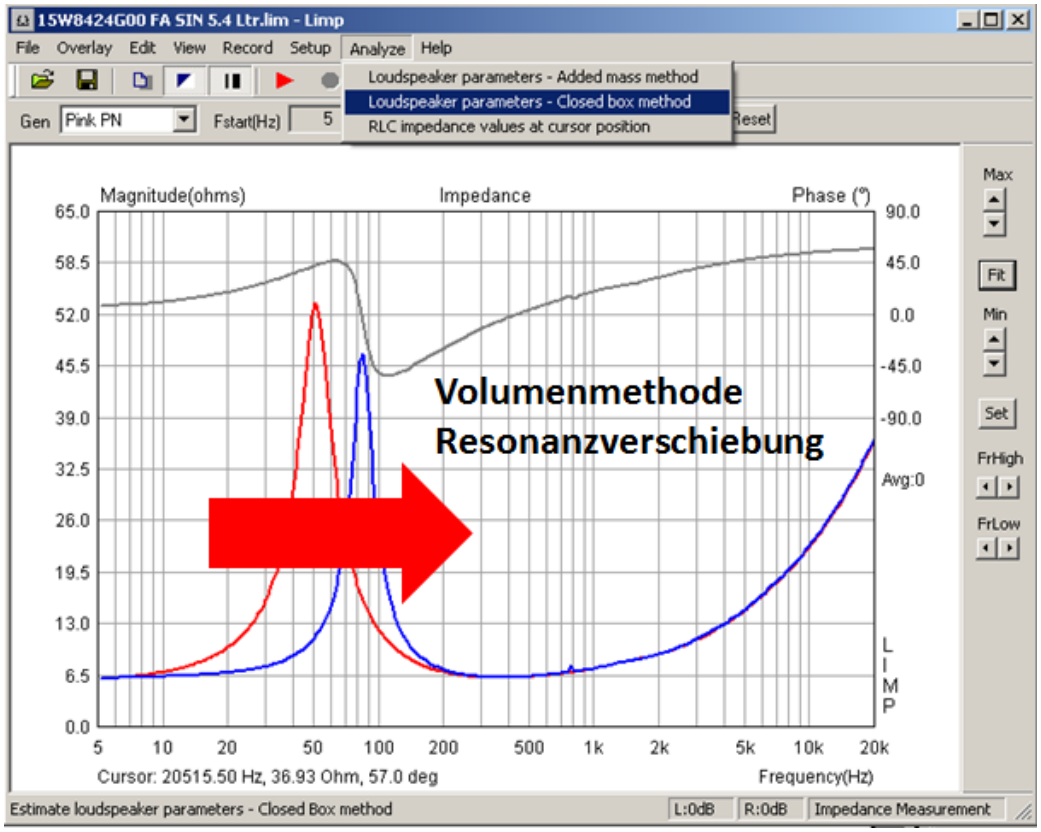


Bild 3.9: Impedanzgang des LS im Gehäuse (blau) und free air (rot)

6) Über das Menü **Analyze → Loudspeaker parameters – Closed box method** können nun die erforderlichen Parameter (R_{DC}, D_D, V_T) im Bereich ‚**User Input**’ eingegeben werden (siehe auch Abschnitt 3.1).

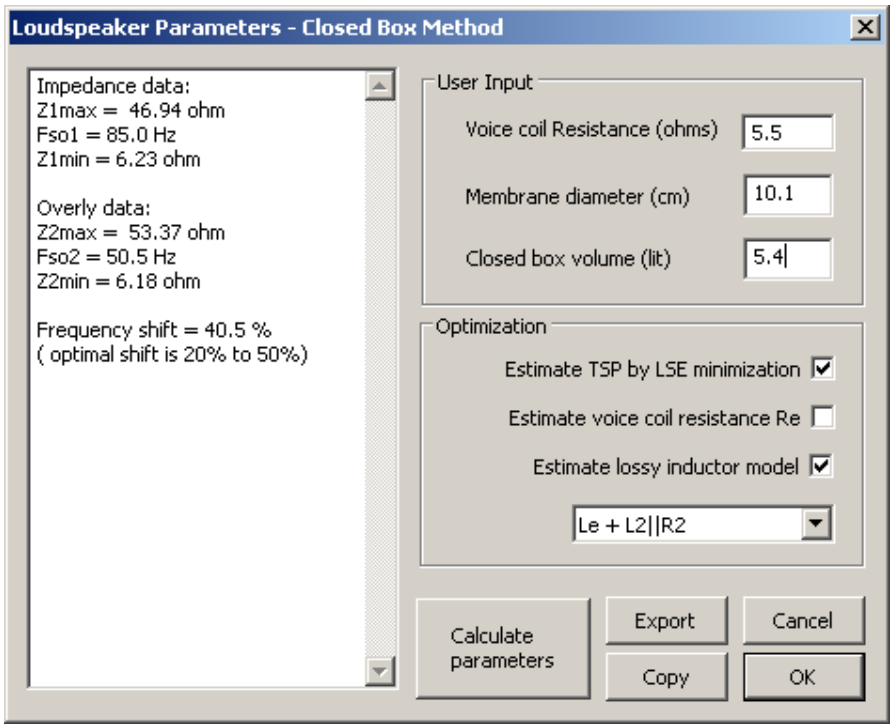


Bild 3.9a: Menü für die Berechnung der TSP

Falls die Eingabefelder für Eingaben gesperrt sind (graue Hinterlegung), ist noch kein Overlay definiert. Durch Betätigung von ‚**Calculate'** errechnet LIMP die TSP (s. Bild 3.7b).

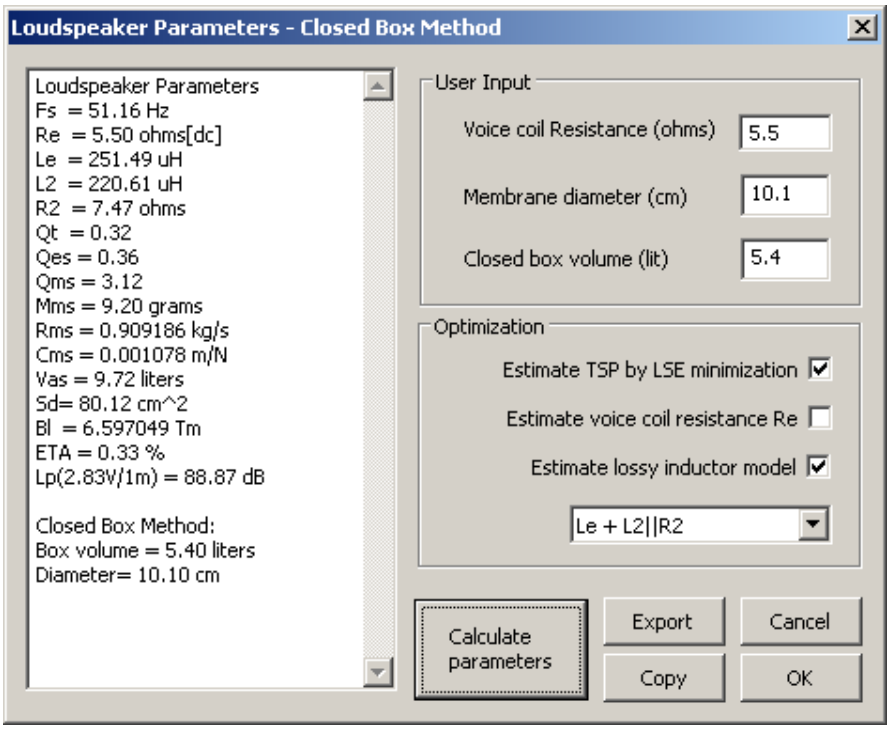


Bild 3.9b: Berechnete TSP

7) Copy
Durch ‚**Copy'** können die errechneten Werte als ASCII in beliebige Dateien kopiert werden. Die Ausgabe erscheint wie im Bild 3.9b gezeigt.

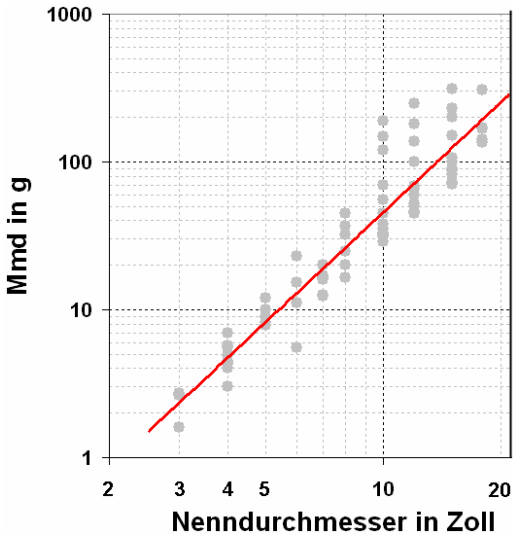
3.4 TSP-Ermittlung, Massemethode

Die Prozedur zur Ermittlung der Thiele-Small-Parameter nach der Massemethode läuft wie folgt:

1) Kalibrieren

2) Testmasse festlegen.
In Abhängigkeit vom Durchmesser (Membranfläche) des zu messenden Lautsprechers ist ein Testmasse mit passendem Gewicht zu beschaffen. Auch bei der Massemethode (Bild 3.1b) soll durch Aufbringen einer Zusatzmasse eine Resonanzverschiebung zwischen 20% und 50% erreicht werden. Eine Zusatzmasse in der Größenordnung der Membranmasse M_{MD} führt in etwa zu einer Senkung der Resonanzfrequenz von 30%.

Sollte die Membranmasse nicht bekannt sein, so kann mit nebenstehendem Diagramm eine grobe Abschätzung vorgenommen werden.



Beispiel: Bei einem 8 Zoll Chassis wird M_{MD} gem. Diagramm zwischen 15 und 50 Gramm betragen. Eine Zusatzmasse von 25 Gramm sollte für den ersten Versuch passen und zu einer auswertbaren Messung führen.

3) und 4)
Punkt 3 und Punkt 4 werden analog der Volumenmethode gehandhabt.

5) Die Messung des LS mit Zusatzmasse durchführen (s. Bild 3.1b)

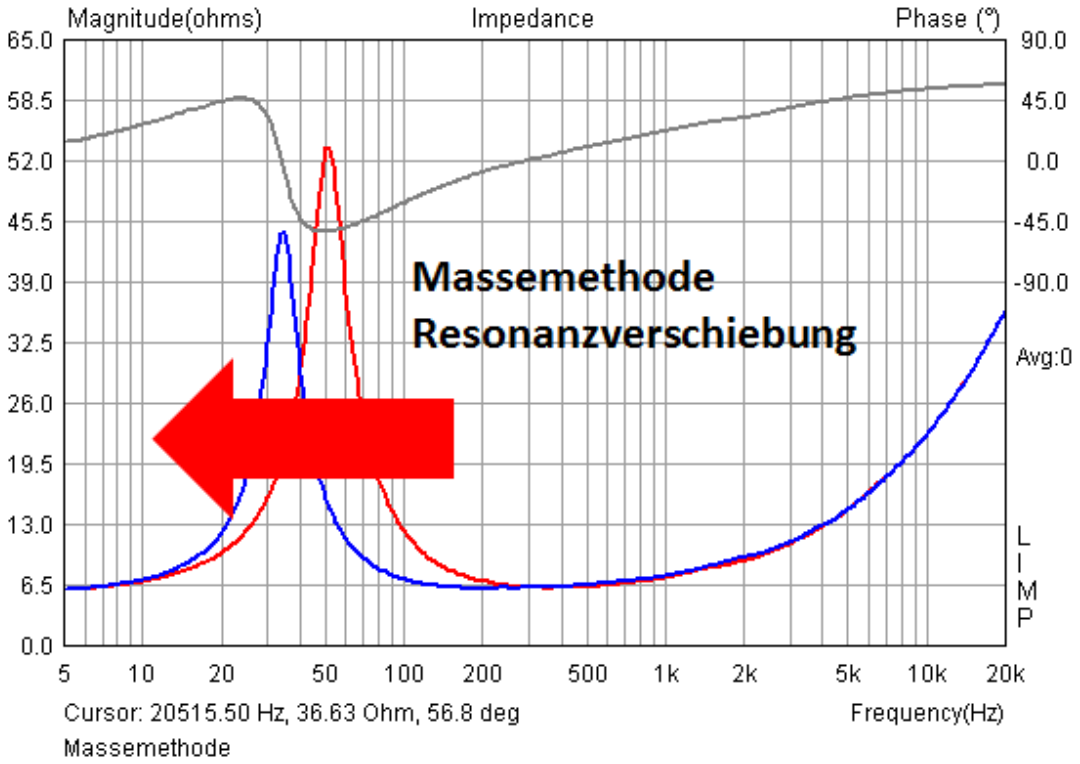


Bild 3.10: Lautsprecher mit (rot) und ohne (grün) Zusatzmasse

6) Über das Menü **Analyze → Loudspeaker Parameters – Added Mass Method** können nun die erforderlichen Parameter (R_{DC}, D_D, M_{ADD}) im Bereich ‚**User Input**' eingegeben werden (siehe auch Abschnitt 3.1).

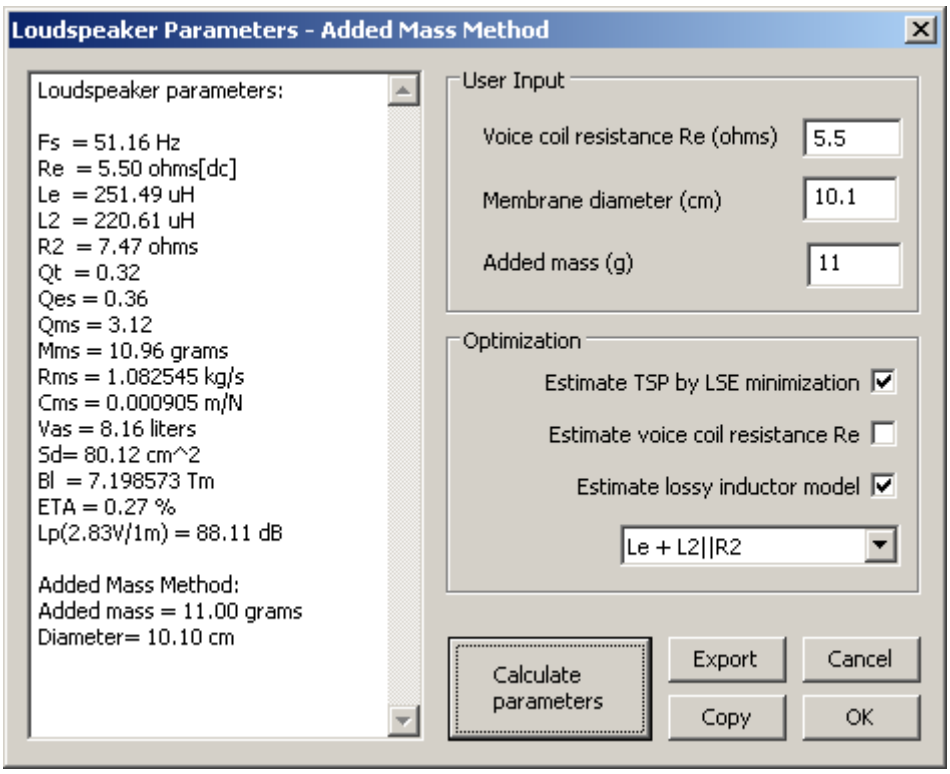
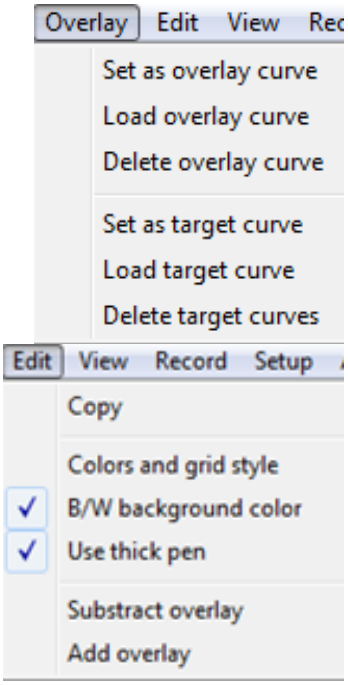


Bild 3.11: Eingabe und Berechnung der TSP

7) Copy
Durch „**Copy to Clipboard"** oder „**Export in CSV File**" können die errechneten Parameter exportiert werden. Sofern mit mehreren Messungen Statistik betrieben werden soll, empfiehlt sich der CSV-Export, denn dann steht die volle Funktionalität von Excel zur Verfügung.

4. LIMP, Arbeiten mit Overlay und Target



Ab dem Release 1.8 stehen nun auch in LIMP im Menü „Overlay“ ein Overlay sowie Targets zur Verfügung. Die Funktion „Set as Overlay“ lässt nur die Hinterlegung eines Overlays zu. Eine erneute Aktivierung der Funktion übernimmt die aktuelle Kurve ins Overlay und das alte Overlay wird automatisch gelöscht. Da die Overlayfunktion primär für die Berechnung der TSP gedacht ist, macht diese Einschränkung durchaus Sinn. Die Funktion „Set as Target“ lässt die Hinterlegung beliebig vieler Targets zu. Dabei ist jedoch zu beachten, dass alle Targets die gleiche Farbe haben.

Ferner sind im Menü „Edit“ mit Add und Subtract Overlay zwei einfache Rechenfunktionen integriert. Ein Anwendungsbeispiel für „Subtract Overlay“ war bereits im Abschnitt Kompensation von Messleitungen angeführt.

Diese neue Funktionalität eröffnet Möglichkeiten, die unter anderem für qualitätssichernde Maßnahmen einsetzbar sind. Beispiele hierfür wären die Selektion von Lautsprecherchassis, Eingangsprüfungen im PA Verleih und anderes mehr. Dazu im Folgenden einige Beispiele und Hinweise zur Nutzung.

Eine Selektion oder eine Eingangsprüfung setzt voraus, dass Toleranzen oder Grenzwerte vorgegeben sind, gegen die geprüft wird. Wie lassen sich jetzt Toleranzen oder Grenzwerte in LIMP darstellen? Ganz einfach durch Import einer Textdatei mit der Endung „TXT“ oder „ZMA“. Die Erzeugung ist mit jedem Texteditor oder mit Excel möglich. Das Dateiformat ist wie folgt:

freq	*mag*	*phase*
91.1	*0.0*	*0.0*
91.1	*22.0*	*0.0*
116.9	*0.0*	*0.0*
116.9	*22.0*	*0.0*

Tabelle 4.1: ZMA-Datei für die Darstellung von Toleranzgrenzen in der Vertikalen (hier fs = 104 ± 12,9 Hz)

Bitte beachten Sie, dass die Dezimale als Punkt ausgeführt sein muss.

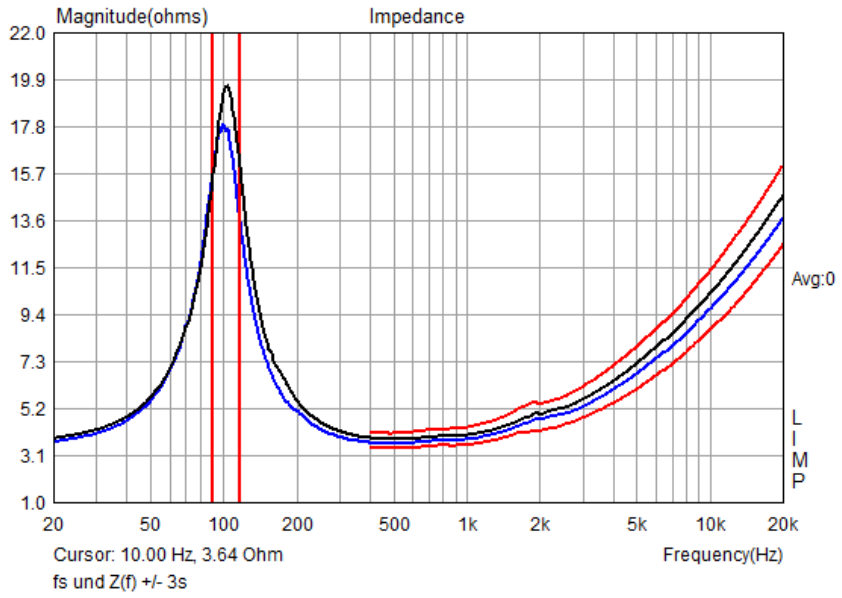


Bild 4.1: Toleranzfelder fs ± 3s und Z(f) ± 3s

Selbstverständlich können auch gemessene - und anschließend manipulierte - Impedanzverläufe als Toleranzgrenzen verwendet werden (siehe Bild 4.1).

Bild 4.2 zeigt die Messung der Resonanzfrequenz von 32 kleinen Tiefmitteltönern. Aus einer vorherigen Bestellung war bekannt, dass die Resonanzfrequenz fs = 104 ± 12.9 Hz betrug. Mittels „Load target curve“ wurden die Toleranzwerte aus Tabelle 4.1 als ZMA-File importiert.

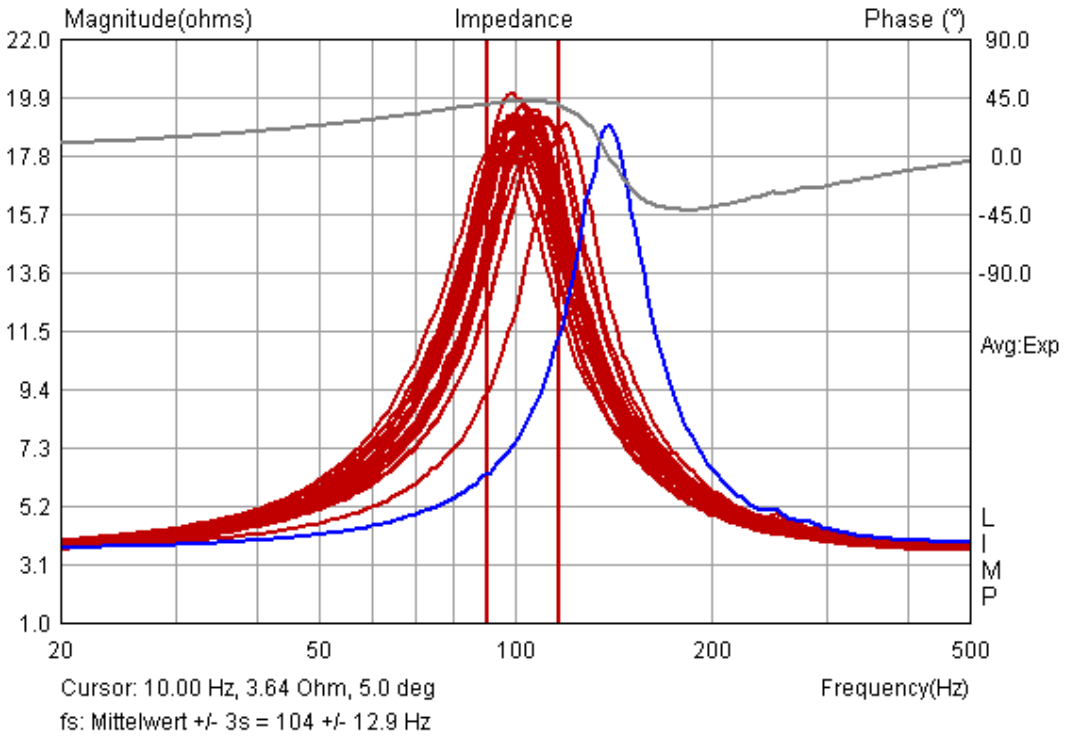


Bild 4.2: Selektion von LS, Toleranzfeld fs ± 3s

5. LIMP als RLC-Meter

LIMP ermittelt den Wert von Widerständen, Kondensatoren und Spulen durch Berechnung des resistiven, induktiven oder kapazitiven Anteils der Impedanz. Bild 5.1 zeigt als Beispiel die Impedanzkurve einer Spule mit einem nominalen Wert von 0,33 mH.

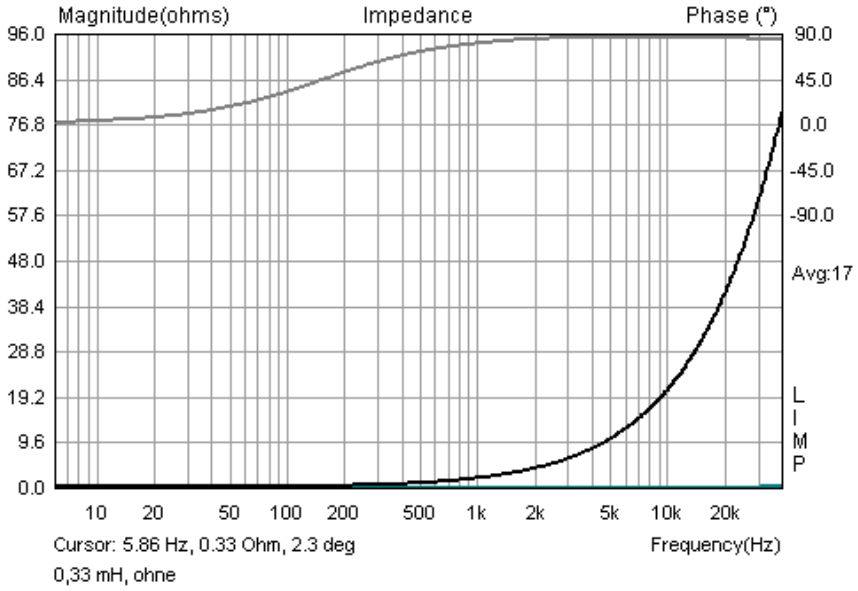
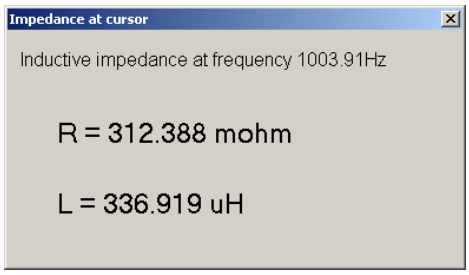


Bild 5.1: Impedanzverlauf einer 0,33 mH Spule



Über das Menü **Analysis → RLC Impedance value at cursor position** erhält man das Ergebnis wie links gezeigt.

LIMP weist aus, dass die gemessene Impedanz an der Cursorposition einen resistiven Anteil von 0,312 Ohm und einen imaginären induktiven Teil mit einem Wert von 0,336 mH hat.

Auf gleiche Weise werden mit LIMP auch Kondensatoren oder reine Widerstände gemessen.

Für die Durchführung von RLC-Messungen ist es wichtig, dass vor der Messung eine Kalibrierung durchgeführt wird, denn selbst bei kleinen Differenzen in der Empfindlichkeit beider Eingangskanäle der Soundkarte (z.B. 0.1dB) kann es passieren, dass LIMP unter bestimmten Bedingungen fehlerbehaftete Ergebnisse liefert, da die Phase einer Induktivität nahezu 90 Grad und die eines Kondensators nahezu -90 Grad beträgt.

Für den Fall, dass die über dem Generator gemessene Spannung V1 und die über der Impedanz Z gemessene Spannung V2 durch Unterschiede in der Empfindlichkeit der beiden Messkanäle verfälscht wird, kann das dazu führen, dass die ermittelte Impedanz auch Phasenwerte von mehr als 90 Grad ausweist und die Phase einen Sprung um 180 Grad macht (s. Bild 5.3).

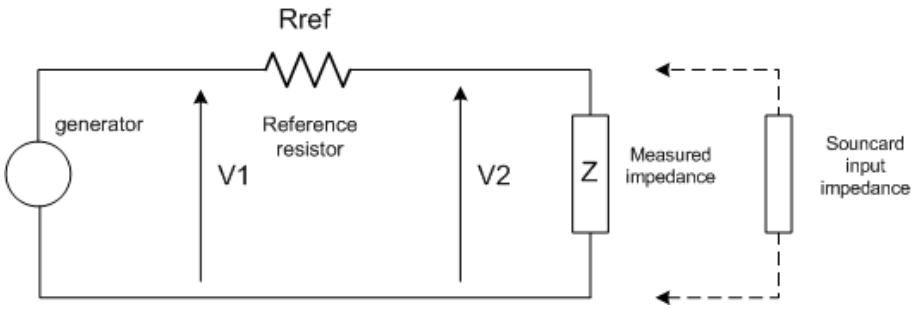


Bild 5.2: Messaufbau für eine Impedanzmessung

Bild 5.3 zeigt das Ergebnis einer Kapazitätsmessung ohne Kalibrierung. Bis ca. 1200 Hz läuft die Phase bei nahezu +90 Grad und vermittelt so den Eindruck, dass es sich um eine Induktivität handelt. Bild 5.4 zeigt das Ergebnis der Messung nach einer Kalibrierung. Es ist zu sehen, dass die Phase sich im gesamten Frequenzbereich nun so verhält wie erwartet.

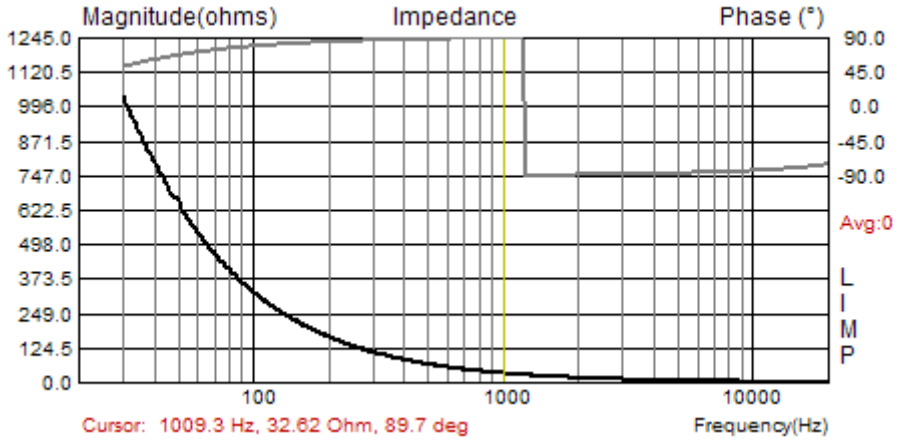


Bild 5.3: Unkalibriert ermittelte Impedanz eines Kondensators mit 4.7uF/250V

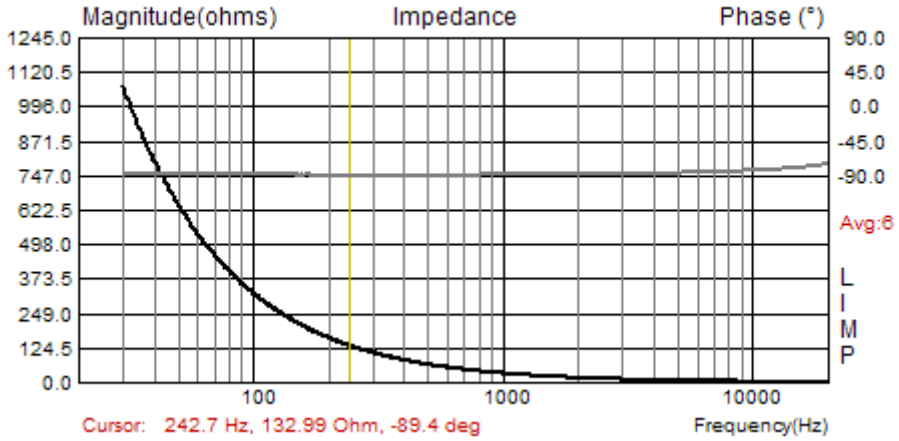


Bild 5.4: Kalibriert ermittelte Impedanz eines Kondensators mit 4.7uF/250V

Um richtige Messwerte für Kapazität und Induktivität zu erhalten, sollte der Cursor auf eine Frequenz gesetzt werden, bei der die Impedanz kleiner ist als 100 Ohm. Das stellt sicher, dass die Messungen im Bereich von ca. 1% Toleranz liegen (Erläuterung siehe Kapitel 6).

Die folgenden Beispiele sollen einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit von LIMP als RLC-Meter im Vergleich zu einem 4-Leiter RLC-Meter (TH2821) und einem Mittelklasse RLC-Meter (Peaktech PT2165) vermitteln. Gemessen wurde mit einer Mittelklasse Soundkarte (EMU Tracker Pre) am Kopfhörerausgang ohne Spannungsteiler (siehe dazu auch Kapitel 6). Alle Werte – mit Ausnahme von zwei kleinen Induktivitäten – liegen unterhalb einer Abweichung von 1%. Bei der Messung von Induktivitäten fällt auf, dass das Peaktech PT2165 fast deckungsgleiche Ergebnisse liefert und somit auch bei den Ausreißern (0,18mH und 0,33mH) vom TH2812 differiert.

Typ	Nominalwert	LIMP	PT2165	TH2821	Δ TH2821
Glatt, bipolar	4,7	4,675	4,674	4,678	-0,06%
Glatt, bipolar	8,2	8,745	8,739	8,755	-0,11%
Glatt, bipolar	33	34,328	34,300	34,390	-0,18%
Glatt, bipolar	47	49,064	49,070	49,140	-0,15%
Rauh, bipolar	150	172,948	173,150	172,260	0,40%
Rauh, bipolar	330	363,039	364,800	360,800	0,62%
Rauh, bipolar	560	547,577	556,300	548,400	-0,15%
Rauh, bipolar	1000	998,007	1035,700	992,100	0,59%

Tabelle 5.1: Vergleich LIMP vs. RLC-Meter, Kondensator, Werte in uF

Typ	Nominalwert	LIMP	PT2165	TH2821	Δ TH2821
Luftspule	0,18	0,183	0,181	0,188	-2,87%
Luftspule	0,27	0,270	0,269	0,272	-0,66%
Luftspule	0,33	0,337	0,337	0,345	-2,30%
Luftspule	0,47	0,479	0,477	0,482	-0,74%
Luftspule	0,82	0,834	0,833	0,840	-0,75%
Luftspule	1,20	1,229	1,228	1,234	-0,44%
HQ40/30	1,50	1,548	1,531	1,537	0,69%
Luftspule	1,50	1,520	1,519	1,526	-0,36%
Luftspule	1,80	1,833	1,833	1,835	-0,13%
Var	2,20	2,200	2,200	2,210	-0,44%
Var	2,70	2,710	2,705	2,716	-0,24%
Var	10,00	10,014	10,003	10,040	-0,26%
Var	14,50	14,514	14,494	14,543	-0,20%

Tabelle 5.2: Vergleich LIMP vs. RLC-Meter, Induktivität, Werte in mH

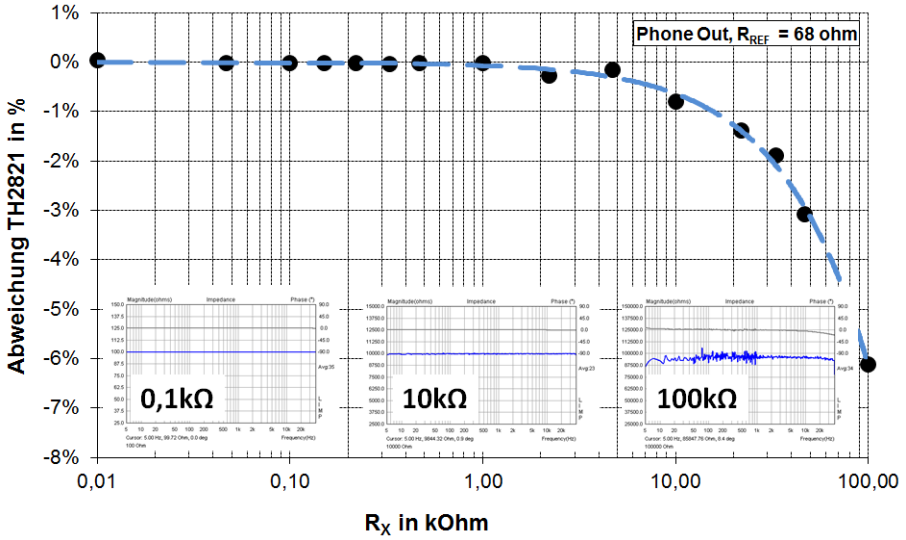


Bild 5.5: Vergleich LIMP vs. RLC-Meter, Widerstand, Werte in kOhm

6. LIMP, Genauigkeit der Messung

Die Leistungsgrenzen von LIMP als RLC-Meter werden durch die Eingangsimpedanz der Soundkarte und den Messaufbau bestimmt. Beste Werte liefern die Messungen, wenn die Soundkarte eine hohe Eingangsimpedanz aufweist und ohne vorgeschalteten Spannungsteiler gearbeitet wird, denn der Parallelwiderstand des Spannungsteilers wirkt hier kontraproduktiv. Die Grenzen dessen, was noch sauber messbar ist, deuten sich im Messdiagramm durch „verrauschte" Messkurven an (siehe Bild 5.5, rechtes Teilbild, 100 kOhm).

Genau aus diesem Grund ist die ARTA-MessBox ein Kompromiss zwischen Messgenauigkeit und Bedienkomfort, der Messfehler sollte jedoch mit den Standardwerten der Application-Note [I] bis ca. 100 Ohm kleiner 1% sein.

> ***Anmerkung:*** *Wenn die eingesetzte Soundkarte eine Eingangsimpedanz > 500 kOhm aufweist, dann können die Werte des Spannungsteilers (R1/R2 und R3/R4) in der ARTA-MessBox um den Faktor 10 erhöht werden. Danach sollte der Messfehler bis 1000 Ohm kleiner 1% sein.*

Bei üblichen Lautsprechermessungen und sauberem Messaufbau ist der Messfehler mit LIMP also kleiner als 1%. Sollte das nicht gegeben sein, so ist häufig eine der folgenden Fehlerquellen dafür verantwortlich:

1. Die Empfindlichkeit der Eingangskanäle der Soundkarte ist unterschiedlich
2. Die Soundkarte hat eine zu niedrige Eingangsimpedanz (10-20 kOhm)
3. Das Messkabel zwischen Leistungsverstärker und Lautsprecher ist zu lang

Abhilfe kann durch folgende Maßnahmen geschaffen werden:

1. Kalibrierung der Soundkarte (siehe Kapitel 2.2.1)
2. Eine Soundkarte mit hoher Eingangsimpedanz verwenden (Spezifikation prüfen, professionelle Soundkarten haben Eingangsimpedanzen von 1MOhm) oder einen Eingangsbuffer vorschalten (siehe z.B. http://www.maazl.de/electronic/LCR/LCR.html)
3. Bei zu langen Messkabeln gehen die induktiven oder kapazitiven Kabelanteile in die Messung ein. Das gilt auch für Übergangswiderstände an Klemmen oder Steckern. Die Devise lautet also:
    a. Kurze Messkabel mit hinreichendem Querschnitt (ca. 1,5 mm^2 oder größer) verwenden
    b. Falls längere Messkabel verwendet werden müssen, den Referenzwiderstand möglichst in der Nähe der Lautsprecherklemme anbringen.
    c. Auf saubere Kontakte achten. Nur Stecker und Klemmen von unzweifelhafter Qualität verwenden [Anm.)].

Anmerkung*: „Messleitungen", wie im rechten Bild dargestellt, sind oft eine Fehlerquelle bei Messungen an Lautsprechern. Da die Kabel nicht selten nur an die Krokodilklemmen geklemmt sind, gibt es in der Abfolge „variable Übergangswiderstände", was der Reproduzierbarkeit von Messungen nicht gerade zuträglich ist. Wenn Sie derartige Produkte verwenden, dann bitte jede Verbindung nachlöten* ***und*** *vor Verwendung den Widerstand messen. Nicht selten haben diese Kabel auch nach dem Löten - aufgrund des verwendeten minderwertigen Materials - noch Widerstände zwischen 0,5 und 1 Ohm.*

7. ARTA Application Notes

[I] No 1: ARTA MessBox

[II] No 2: RLC Messung mit LIMP

[III] No 3: Why 64 Bit Processing

[IV] No 4: Ermittlung des Freifeldfrequenzgangs

[V] No 5: Die ARTA-Mikrofonkalibrierkammer fürs untere Ende

[VI] No 6: Directivity und Polar

[VII] No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS

[VIII] No 8: Wiederholmessungen mit der Scriptsprache Auto IT

[IX] No 9: In-Situ Messung zur Abschätzung von Absorptionskoeffizienten mit ARTA (demnächst)

8. Literatur

[1] Mateljan, Ivo: "ARTA-Manuals"

[2] D'Appolito, Joseph: "Lautsprechermesstechnik", Elektor Verlag, 1999.

[3] Vance Dickason: Lautsprecherbau, Bewährte Rezepte für den perfekten Bau, Elektor Verlag, 6. Auflage, 2001

[4] ARTA Hardware & Tools Manual

[5] Anderson: Derivation of Moving Coil Loudspeaker Parameters using Plane Wave Tube Techniques, Master Thesis, 2003

[6] Withold, Waldman: Non-Linear Least Squares Estimation of Thiele-Small Parameters from Impedance Measurements, 1993, Preprint 3511

[7] Neville Thiele, Richard Small: Loudspeaker Parameters, Tutorial, AES 124th Convention, 2008

[8] AES2-2012: AES standard for acoustics – Methods of measuring and specifying the performance of loudspeakers for professional applications – Dive units, AES, 2012

[9] SB Acoustics: Technical note, Measuring Thiele/Small Parameters

[10] Ivo Mateljan, Marjan Sokora: Estimation of Loudspeaker Driver Parameters, 5th Congress of the Alps Adria Acoustics Association, 2012

[11] IEC 60268-5:2003: Elektroakustische Geräte, Teil 5: Lautsprecher

[12] www.hifi-selbstbau.de: TSP checken einfach gemacht

9. Index

I

Impedanz
  Messfehler 32
Installation
  Programm 4

K

Kopfhörer
  Impedanz 8

L

Lautsprecher
  effektive Membranfläche 19
  Einspielen 17
  RE mit Multimeter messen 19
LIMP
  Kondensator messen 29
  Spulen messen 29
  Widerstand messen 31

M

Messkabel
  kompensieren 14

Q

Qualitätssicherung
  Toleranzen eingeben 27

S

Selektion von Lautsprecherchassis 27
Soundkarte
  ASIO Treiber 11
Spannungsteiler 9

T

TSP
  Anregungspegel wählen 16
  im Testgehäuse messen 23
  Messen 16
  Messlage des Lautsprechers 16
  mit Zusatzmasse messen 25

V

Verbindungskabel
  Steckerbelegung 6